

# Emmy Noether

## ihre Zeit und ihre Bedeutung für die Physik

Jutta Kunz

Institut für Physik  
CvO Universität Oldenburg



# Outline

- 1 Biographie
  - Kurzportrait
  - Familie
  - Die Erlanger Zeit: 1882 - 1915
  - Die Göttinger Zeit: 1915 - 1933
  - Die Zeit in Bryn Mawr: 1933 - 1935

- 2 Bedeutung für die Physik
  - Symmetrien
  - Raumzeit Symmetrien
  - Innere Symmetrien: Das Standardmodell
  - Das Noethersche Theorem

- 3 Epilog
  - Epilog

# Outline

- 1 Biographie
  - Kurzportrait
  - Familie
  - Die Erlanger Zeit: 1882 - 1915
  - Die Göttinger Zeit: 1915 - 1933
  - Die Zeit in Bryn Mawr: 1933 - 1935

- 2 Bedeutung für die Physik
  - Symmetrien
  - Raumzeit Symmetrien
  - Innere Symmetrien: Das Standardmodell
  - Das Noethersche Theorem

- 3 Epilog
  - Epilog

# Outline

- 1 Biographie
  - Kurzportrait
  - Familie
  - Die Erlanger Zeit: 1882 - 1915
  - Die Göttinger Zeit: 1915 - 1933
  - Die Zeit in Bryn Mawr: 1933 - 1935

- 2 Bedeutung für die Physik
  - Symmetrien
  - Raumzeit Symmetrien
  - Innere Symmetrien: Das Standardmodell
  - Das Noethersche Theorem

- 3 Epilog
  - Epilog

# Outline

- 1 **Biographie**
  - Kurzportrait
  - Familie
  - Die Erlanger Zeit: 1882 - 1915
  - Die Göttinger Zeit: 1915 - 1933
  - Die Zeit in Bryn Mawr: 1933 - 1935
- 2 **Bedeutung für die Physik**
  - Symmetrien
  - Raumzeit Symmetrien
  - Innere Symmetrien: Das Standardmodell
  - Das Noethersche Theorem
- 3 **Epilog**
  - Epilog

# Emmy Noether: 1882 - 1935



# Kurzportrait

Weltausstellung 1964: New York

Im Raum der Mathematik findet man unter dem Titel

“Men of Modern Mathematics”

die Portraits von ca. 80 Mathematikern und dabei das Bild einer einzigen Frau:



*Emmy Noether, Tochter des Mathematikers Max Noether, wurde oft “der Noether” genannt. Ihre Göttinger Professur versah sie ohne Gehalt, und Hilbert mußte kämpfen, um sie - als Frau - überhaupt an die Universität zu bringen. Sie war dick, rauh und laut, aber so gütig, humorvoll und umgänglich, daß alle, die sie kannten, sie gerne mochten. Als die Nazis an die Macht kamen, ging sie in die USA.*

# Outline

## 1 Biographie

- Kurzportrait
- **Familie**
- Die Erlanger Zeit: 1882 - 1915
- Die Göttinger Zeit: 1915 - 1933
- Die Zeit in Bryn Mawr: 1933 - 1935

## 2 Bedeutung für die Physik

- Symmetrien
- Raumzeit Symmetrien
- Innere Symmetrien: Das Standardmodell
- Das Noethersche Theorem

## 3 Epilog

- Epilog



# Vater

## Vater: Max Noether

1844 in Mannheim geboren

1921 in Erlangen gestorben

- Max Noether kam aus einer sehr gut situierten jüdischen Familie von Eisengroßhändlern.
- Er erkrankte mit 14 Jahren an Kinderlähmung und blieb gehbehindert.
- Max Noether wurde Mathematiker und Universitätsprofessor für Mathematik in Erlangen.
- 1880 heiratete er Ida Amalia Kaufmann.



# Mutter

## Mutter: Ida Amalia Kaufmann

1852 in Köln geboren

1915 in Erlangen gestorben

- Ida Amalia Kaufmann war Tochter aus reichem jüdischen Hause.
- Einer der Brüder von Ida war in Berlin Universitätsprofessor. Von ihm und einem zweiten Bruder, der in Berlin Großkaufmann war, stammte ein Teil des Vermögens, von dem Emmy später lebte.
- 1880 heiratete sie Max Noether.
- Ida Amalia Noether bekam 4 Kinder.



# Geschwister

- **Emmy**  
1882 - 1935  
Professor für Mathematik  
Göttingen, Bryn Mawr
- **Alfred**  
1883 - 1918  
Chemiker
- **Fritz**  
1884 - 1937  
Professor für Mathematik  
Breslau, Tomsk
- **Gustav Robert**  
1889 - 1928



# Familie kurz vor dem 1. Weltkrieg



# Outline

1

## Biographie

- Kurzportrait
- Familie
- **Die Erlanger Zeit: 1882 - 1915**
- Die Göttinger Zeit: 1915 - 1933
- Die Zeit in Bryn Mawr: 1933 - 1935

2

## Bedeutung für die Physik

- Symmetrien
- Raumzeit Symmetrien
- Innere Symmetrien: Das Standardmodell
- Das Noethersche Theorem

3

## Epilog

- Epilog

# Kindheit und Jugend

## 1882 - 1900 (0 - 18 Jahre)

“Emmy war ein kluges, freundliches und liebenswertes Kind.”

- Städtische höhere Töchterschule in Erlangen: 1889 - 1897  
*das entsprach der Unterstufe der Höheren Schule (ohne Latein)*
- Französisch und Englisch  
*mit großem Erfolg*
- Klavierunterricht  
*ohne großen Erfolg*
- Haushaltsführung  
*ohne bleibenden Erfolg*
- Tanzen  
*Hobby*
- Berufsausbildung ?



# Beruf: Lehrerin?

## 1900 (18 Jahre)

- Bayrische Staatsprüfung für Lehrerinnen: 1900  
*Englisch und Französisch*  
*fast alle Noten sehr gut, nur "praktisches Schulhalten" gut*
- Trotz Berechtigung zum Unterrichten wollte sie nun aber **studieren!**

### Hintergrund

*Um 1900 durften Frauen in Deutschland noch nicht studieren: sie konnten sich nicht als ordentliche Studierende immatrikulieren, sondern wurden als Hörerinnen ohne Rechte auf Prüfungen zugelassen, wenn der Professor, dessen Vorlesungen sie hören wollten, die Genehmigung erteilt hatte.*

*Es kam aber öfter vor, daß Professoren eine solche Genehmigung verweigerten.*

# Reifeprüfung fürs Studium

1900 - 1903 (18 - 21 Jahre)

- Gasthörerin an der Universität **Erlangen**: 1900-1902

*Sprachen*

*Geschichte*

*Mathematik?*

- Vorbereitung auf die Reifeprüfung

*Reifeprüfung 1903*

*Formale Voraussetzung  
für ein Studium*





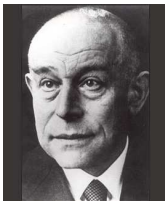
# Reifeprüfung fürs Studium

1900 - 1903 (18 - 21 Jahre)

- Gasthörerin an der  
Universität **Göttingen**  
WS 1903/1904

*Astronomie:*  
*Schwarzschild*

*Mathematik:*  
*Minkowski, Blumenthal, Klein, Hilbert*



# Studium

## 1904 - 1908 (22 - 26 Jahre)

*Jetzt wurde es gesetzlich möglich, daß weibliche Studierende ordentlich immatrikuliert wurden und ihre Prüfungen in Gleichberechtigung mit den Studenten ablegen konnten.*

- Zum WS 1904/05 wurde Emmy Noether an der Universität Erlangen immatrikuliert mit Studienrichtung **Mathematik**.  
*unter 205 Studierenden gab es 4 immatrikulierte Frauen*
- Studium 1904-1907  
*Vorlesungen bei Max Noether*  
*Vorlesungen bei Paul Gordan, Kollege und Freund des Vaters*
- Disputation mit **summa cum laude**
- Promotion 1908

# Doktorvater

## Doktorvater: Paul Gordan

1837 - 1912

- *König der Invarianten*
- Dissertationsthema:  
*“Über die Bildung des Formensystems der ternären biquadratischen Form”*
- erste wissenschaftliche Veröffentlichung



# Dr. Emmy Noether



## 1908 - 1915 (26 - 33 Jahre)

*Frauen wurden noch nicht zur Habilitation zugelassen*

- Emmy Noether widmete sich weiterhin der Mathematik:

*Sie arbeitete ohne Anstellung oder Auftrag am Mathematischen Institut der Universität Erlangen*

*- teils an eigenen Forschungsarbeiten*

*- teils zur Entlastung des Vaters*

- Sie wurde 1908 Mitglied des Circolo matematico di Palermo.
- Sie wurde 1909 Mitglied der Deutschen Mathematikervereinigung.
- Sie besuchte wissenschaftliche Kongresse und hielt dort Vorträge.
- Sie hatte "Dissertanten".

# Outline

1

## Biographie

- Kurzportrait
- Familie
- Die Erlanger Zeit: 1882 - 1915
- **Die Göttinger Zeit: 1915 - 1933**
- Die Zeit in Bryn Mawr: 1933 - 1935

2

## Bedeutung für die Physik

- Symmetrien
- Raumzeit Symmetrien
- Innere Symmetrien: Das Standardmodell
- Das Noethersche Theorem

3

## Epilog

- Epilog

# Die Mathematik in Göttingen



Felix Klein 1849 – 1925



David Hilbert: 1862 – 1943

# Hilbert und Klein holen Emmy Noether

- Hilbert und Klein holten Emmy Noether aus persönlichem Interesse aufgrund ihrer mathematischen Expertise aus Erlangen nach Göttingen.
- Emmy Noether ist Expertin für Invarianten

*Hilbert's früheres Arbeitsgebiet*

- Hilbert's gegenwärtiges Forschungsinteresse

**1915: ART**

*Einsteinsche Allgemeine Relativitätstheorie*



Mathematisches Institut  
Universität Göttingen



# November 1915

- Emmy Noether schrieb nach Erlangen,  
*Invariantentheorie ist hier jetzt Trumpf*  
*sogar der Physiker Hertz studiert Gordan-Kerscheneiner*  
*Hilbert will nächste Woche über seine Einsteinschen Differentialinvarianten vortragen*
- Sie sagte weiterhin,  
*sie gehöre in Göttingen zu einem Team, das Berechnungen schwierigster Art für Einstein durchführe.*



Einstein: 1879-1955

# Habilitation in Göttingen 1915 ???

November 1915:

- Hilbert und Klein wollten Emmy Noether in Göttingen halten
- Klein:  
*“...daß mich Frl. Noether bei meinen Arbeiten fortgesetzt berät und daß ich eigentlich nur durch sie in die vorliegende Materie eingedrungen bin”*
- Hilbert:  
*“...Emmy Noether, deren Hilfe ich zur Klärung derartiger meinen Energiesatz betreffender Fragen...anrief...”*  
*Der Fach-Invariantentheoretiker Hilbert rief also tatsächlich die Schülerin des Invariantenkönigs zu Hilfe.*
- Hilbert und Klein befürworteten die Habilitation von Emmy Noether in Göttingen

# Habilitation in Göttingen 1915 ???

- Habilitationsvortrag von Emmy Noether vor der Fakultät:

*“...das hat sich sogar der hiesige Geograph angehört, für den es ein bißchen abstrakt war; die Fakultät will sich in ihrer Sitzung von den Mathematikern keine Katze im Sack verkaufen lassen”*

- Kontroverse
- Hilbert:

*“...daß er es nicht einsehe, wieso das Geschlecht der Kandidaten ein Argument gegen eine Zulassung als Privatdozent sein solle. Schließlich sei man, nach allem was er wisse, eine Universität und nicht eine Badeanstalt...”*



Mathematisches Institut  
Universität Göttingen

# Keine Habilitation in Göttingen 1915

- Argumente der Philologen  
*“...müssen die Soldaten, wenn sie aus dem Krieg zurückkommen, sich nun in ihren Vorlesungen zu Füßen einer Frau wiederfinden...”*
- die Habilitation konnte nicht stattfinden **“wegen Fehlens der gesetzlichen Voraussetzungen”**  
*Privatdozentenverordnung: nur männliche Bewerber werden zur Habilitation zugelassen*
- ein Dispens wurde vom Kultusminister abgelehnt



Badeanstalt

# Göttingen 1915-1919

- Vorlesungsverzeichnis Wintersemester 1916/1917

**Mathematisch-physikalisches Seminar  
Invariantentheorie  
Prof. Hilbert mit Unterstützung von Frl. Dr. E. Noether  
Montags 4-6  
gratis**

- Vorlesungsverzeichnis der folgenden Semester  
bis einschließlich Sommersemester 1919  
dieselbe Beifügung zu Hilberts Veranstaltungen

# Göttingen 1915-1919

- Unterstützung von Hilbert  
*Vorlesungen und Übungen*
  - eigene Forschungstätigkeit  
*Invarianten*
- “Noethers Theorem”**

## Invariante Variationsprobleme

Nachr. d. König. Gesellsch. d. Wiss. zu  
Göttingen, Math-phys. Klasse  
(1918), 235-257

- Habilitationsschrift  
*zentrale Bedeutung in der  
Physik*

### Invariante Variationsprobleme.

(F. Klein zum fünfzigjährigen Doktorjubiläum.)

Von

**Emmy Noether** in Göttingen.

Vorgelegt von F. Klein in der Sitzung vom 26. Juli 1918<sup>1)</sup>.

Es handelt sich um Variationsprobleme, die eine kontinuierliche Gruppe (im Lieschen Sinne) gestatten; die daraus sich ergebenden Folgerungen für die zugehörigen Differentialgleichungen finden ihren allgemeinsten Ausdruck in den in § 1 formulierten, in den folgenden Paragraphen bewiesenen Sätzen. Über diese aus Variationsproblemen entspringenden Differentialgleichungen lassen sich viel präzisere Aussagen machen als über beliebige, eine Gruppe gestattende Differentialgleichungen, die den Gegenstand der Lieschen Untersuchungen bilden. Das folgende beruht also auf einer Verbindung der Methoden der formalen Variationsrechnung mit denen der Lieschen Gruppentheorie. Für spezielle Gruppen und Variationsprobleme ist diese Verbindung der Methoden nicht neu; ich erwähne Hamel und Herglots für spezielle endliche, Lorents und seine Schüler (z. B. Fokker), Weyl und Klein für spezielle unendliche Gruppen<sup>2)</sup>. Insbesondere sind die zweite Kleinsche Note und die vorliegenden Ausführungen gegenseitig durch einander beein-

1) Die endgültige Fassung des Manuskriptes wurde erst Ende September eingereicht.

2) Hamel: Math. Ann. Bd. 59 und Zeitschrift f. Math. u. Phys. Bd. 50. Herglots: Ann. d. Phys. (4) Bd. 38, bes. § 9, S. 511. Fokker, Verslag d. Amsterdamer Akad., 27./1. 1917. Für die weitere Literatur vergl. die zweite Note von Klein: Göttinger Nachrichten 19. Juli 1918.

In einer eben erschienenen Arbeit von Kneser (Math. Zeitschrift Bd. 2) handelt es sich um Aufstellung von Invarianten nach ähnlicher Methode.

Kgl. Ges. d. Wiss. Nachrichten. Math.-phys. Klasse, 1918, Heft 2.

# Habilitation in Göttingen 1919

- Nach dem Krieg erfolgte eine rechtliche Besserstellung der Frauen
  - Frauen erhielten das Wahlrecht*
  - Frauen saßen im Parlament*
- Emmy Noether konnte habilitieren
- sie wurde 1919 Privatdozent *mit 37 Jahren*
- im Herbst-Zwischensemester 1919 fand die erste Vorlesung statt, die unter dem Namen Dr. Emmy Noether angekündigt wurde



Privatdozent Emmy Noether

# außerordentlicher Professor

- PD Emmy Noether liest  
*Analytische Geometrie*  
*Differentialinvarianten*  
*Algebra*  
*Zahlentheorie*  
*usw.*
- 1922 wird Emmy Noether  
**außerordentlicher Professor**  
*ein Titel ohne Mittel*  
*nicht-beamtet*  
*ohne Bezahlung*  
*ohne Pension*



Professor Emmy Noether



# Göttingen 1922-1933

- Emmy Noether wurde nie ordentlicher Professor in Göttingen  
*sie erhielt allerdings ein minimales Gehalt - ohne Pensionsansprüche*  
*ihr geerbtes Vermögen ging in der Inflation 1922/1923 verloren*

- Emmy Noether  
*lebte in einer Studentenküche bis sich die Studenten beschwerten, mit einer "marxistischen Jüdin" speisen zu müssen*  
*schwamm täglich in einer öffentlichen Badeanstalt "nur für Männer"*



Badeanstalt  
"Nur für Männer"

# Göttingen 1922 - 1933

- Vorlesungen

*am liebsten las sie über eigene  
noch in der Entwicklung  
begriffene Theorien*

*sie versuchte neue Beweise an  
der Tafel zu führen*

*“...ich lese diesen Winter  
hyperkomplex, was mir und den  
Zuhörern viel Vergnügen macht...”*

- Studenten

## **die Noether-Knaben**

*viele bekannte Mathematiker und  
Professoren*



Professor Emmy Noether

# Göttingen 1922 - 1933

- Wissenschaftlerin  
*23 ihrer 44 Publikationen*
- Mitarbeiterin der Mathematischen Annalen
- Attraktion  
*zahlreiche Mathematiker kamen aus dem Ausland in das Weltzentrum der Mathematik, wie Göttingen genannt wurde*  
*Hopf und Alexandroff 1935: "...die allgemeine mathematische Einsicht Emmy Noethers beschränkte sich nicht auf ihr spezielles Wirkungsgebiet, die Algebra, sondern übte einen lebhaften Einfluß auf jeden aus, der zu ihr in mathematische Beziehung kam..."*



Professor Emmy Noether

# Göttingen 1922-1933

- 1928/29 hatte Emmy Noether eine Gastprofessur in Moskau
- 1932 erhielt sie den Alfred Ackermann-Teubner-Gedächtnispreis für ihre wissenschaftlichen Leistungen
- 1932 feierten die Algebraiker **Emmy Noethers 50sten Geburtstag**
- 1932 hatte sie einen Hauptvortrag auf dem Internationalen Mathematikerkongreß in Zürich



Professor Emmy Noether

# Göttingen 1933

## Hitler wurde Reichskanzler

- Emmy Noether wurde entlassen  
*“Aufgrund des §3 des Berufsbeamtentums vom 7. April 1933 entziehe ich Ihnen hiermit die Lehrbefugnis an der Universität Göttingen”.*
- sie gehörte zu den **ersten** 6 Professoren, die entlassen wurden  
*“...die Emanzipation der Frauen geht auf den jüdischen Intellekt zurück...”*  
*“...Aufgabe der Frauen ist es schön zu sein und Kinder zu gebären...”*
- auch Max Born und Richard Courant wurden entlassen



# Exodus

- Göttingen verliert die meisten seiner Top Wissenschaftler **James Franck, Max Born, Richard Courant, Hertha Sponer, Edward Teller, Edmund Landau, Herman Weyl, Emmy Noether**
- Auf die Frage des neuen Bildungsministers "...wie ist nun die Mathematik in Göttingen, wo sie vom jüdischen Einfluß befreit wurde?" antwortet Hilbert "Mathematik in Göttingen? Es gibt keine Mathematik mehr in Göttingen".
- Emmy Noether geht 1933 nach **Bryn Mawr** in den USA



Emmy Noether  
verläßt Deutschland

# Outline

- 1 **Biographie**
  - Kurzportrait
  - Familie
  - Die Erlanger Zeit: 1882 - 1915
  - Die Göttinger Zeit: 1915 - 1933
  - **Die Zeit in Bryn Mawr: 1933 - 1935**
- 2 **Bedeutung für die Physik**
  - Symmetrien
  - Raumzeit Symmetrien
  - Innere Symmetrien: Das Standardmodell
  - Das Noethersche Theorem
- 3 **Epilog**
  - Epilog

# Emigration

- Emigration

*Moskau, UDSSR ?*

*Oxford, GB ?*

*Princeton, USA ?*

- Bryn Mawr, PA, USA

*Ende Oktober 1933 übernimmt Emmy Noether eine Gastprofessur am Bryn Mawr College bei Philadelphia in Pennsylvania*

*Women's College*

- Finanzierung

*Rockefeller Foundation*

*Edward R. Murrow's Emergency Committee to Aid Displaced German Scholars*



Bryn Mawr College



# Bryn Mawr: 1933 - 1935

- Mathematikkollegin und Freundin  
*Anna Peel Wheeler (1883-1966)*  
*Studium 1906/07 in Göttingen*
- Noether Girls
  - *Olga Taussky*  
*Professorin*  
*am CalTech*
  - *Marie Weiss*
  - *Grace Shover*  
*Professorin*  
*in Washington D.C.*
  - *Ruth Stauffer*



Bryn Mawr College

# Bryn Mawr: 1933 - 1935

- Bryn Mawr - Princeton:  
*Princeton war nur etwa 50 Meilen entfernt*

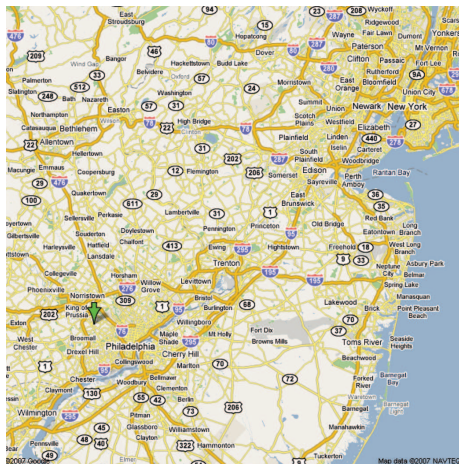
*Einstein und Weyl waren in Princeton*

- Lehre in Princeton:

*Emmy Noether fuhr jede Woche nach Princeton um am Institute for Advanced Study Vorlesung zu halten*

*“... daß Princeton gern ein zweites Göttingen werden wolle..”*

*“...teilweise ist auch der mathematische Standard schon sehr gut..”*



Bryn Mawr - Princeton

# Göttingen 1934

- Emmy Noether geht im Sommer 1934 noch einmal nach Deutschland  
*an eine Rückkehr ist nicht zu denken*  
*Haushaltsauflösung*  
*Abschied von ihrem Bruder Fritz*
- Göttingen  
*als "auswärtige Gelehrte" benutzt sie die Bibliothek*  
*kaum noch Bekannte und Freunde sind in Göttingen*
- Emmy Noether geht im Früherbst 1934 zurück in die USA



Fritz und Emmy Noether

# Bryn Mawr: 1933 - 1935

- permanente Anstellung?  
*Lefschetz (Princeton): "...ohne ihre Rasse, ihre Geschlecht, und ihre liberalen politischen Ansichten, hätte sie eine erstklassige Professur in Deutschland gehabt... ..unter den deutschen Mathematikern ist sie der überragende Flüchtling... würde nichts für sie getan, wäre das ein wahrer Skandal..."*
- Bryn Mawr  
*Finanzierung für 2 weitere Jahre*
- Princeton  
*Pläne...*



Princeton

# Bryn Mawr: 1935

- April 1935 Tumoroperation †  
*Emmy Noether stirbt am 14.4.*
- New York Times  
*Einstein: "...nach dem Urteil der kompetentesten Mathematiker unserer Zeit war Fräulein Noether das bedeutendste kreative mathematische Genie...seit die höhere Bildung von Frauen begann... ..sie hat Methoden entdeckt, die sich als enorm wichtig erwiesen haben... ..machten die letzten Jahre die glücklichsten und vielleicht die fruchtbarsten ihrer gesamten Karriere."*
- Annalen: Nachruf!



Professor Emmy Noether

# Outline

- 1 Biographie
  - Kurzportrait
  - Familie
  - Die Erlanger Zeit: 1882 - 1915
  - Die Göttinger Zeit: 1915 - 1933
  - Die Zeit in Bryn Mawr: 1933 - 1935

- 2 **Bedeutung für die Physik**
  - **Symmetrien**
  - Raumzeit Symmetrien
  - Innere Symmetrien: Das Standardmodell
  - Das Noethersche Theorem

- 3 Epilog
  - Epilog

# Spiegelsymmetrie

Symmetrie in der Natur:



Spiegelsymmetrie: Spiegelung an einer Achse

# Symmetrie unter Drehungen

Symmetrie in der Natur:



Symmetrie unter Drehungen um  $120^\circ$



# Symmetrie unter Drehungen

Symmetrie in der Natur:

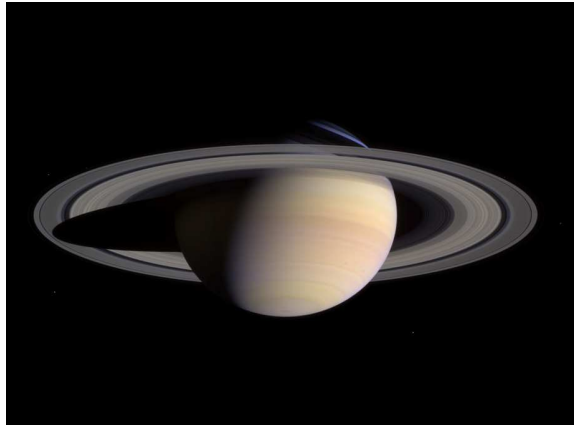


Symmetrie unter Drehungen um  $60^\circ$

# Kontinuierliche Symmetrie unter Drehungen

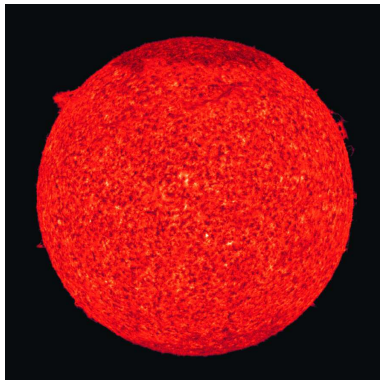
Der Körper wird bei Drehung um die Symmetrieachse auf sich selbst abgebildet.

Der Drehwinkel kann eine **beliebige** Größe haben.

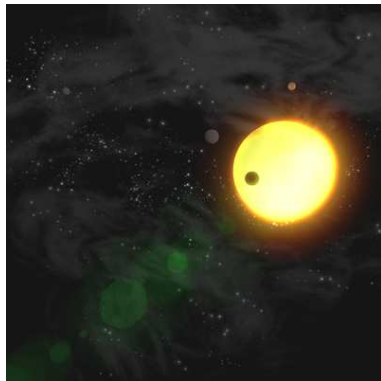


Saturn mit Ringen

# Kontinuierliche Symmetrie unter Drehungen



Sonne



fremdes Sonnensystem

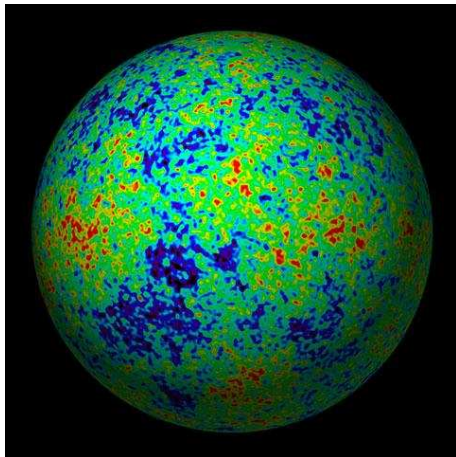
Drehungen um beliebige Achsen durch dem Mittelpunkt

# Kontinuierliche Symmetrie unter Verschiebungen und Drehungen

Das Universum ist  
homogen und  
isotrop:

**homogen:**  
an jedem Ort  
gleich

**isotrop:**  
in jeder Richtung  
gleich



kosmische Hintergrundstrahlung

# Symmetrien und Erhaltungsgrößen

Physikalische Größen, die sich im Lauf der Zeit nicht ändern, heißen Erhaltungsgrößen

## Noethersches Theorem:

Zu jeder kontinuierlichen Symmetrie gehört eine Erhaltungsgröße.



# Outline

- 1 Biographie
  - Kurzportrait
  - Familie
  - Die Erlanger Zeit: 1882 - 1915
  - Die Göttinger Zeit: 1915 - 1933
  - Die Zeit in Bryn Mawr: 1933 - 1935

- 2 **Bedeutung für die Physik**

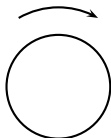
- Symmetrien
- **Raumzeit Symmetrien**
- Innere Symmetrien: Das Standardmodell
- Das Noethersche Theorem

- 3 Epilog

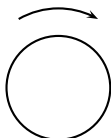
- Epilog

# Translationssymmetrie

Beispiel: Kugel ohne Reibung



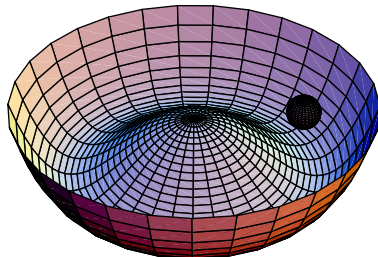
Keine Delle in der Ebene  $\Leftrightarrow$  Translations**symmetrie**  $\Leftrightarrow$  keine Änderung der Geschwindigkeit  $\Leftrightarrow$  keine Änderung des Impulses  $\Leftrightarrow$  Impul**serhaltung**



Delle in der Ebene  $\Leftrightarrow$  **keine** Translationssymmetrie  $\Leftrightarrow$  Änderung der Geschwindigkeit  $\Leftrightarrow$  Änderung des Impulses  $\Leftrightarrow$  **keine** Impulserhaltung

# Rotationssymmetrie

Beispiel: Kugel ohne Reibung

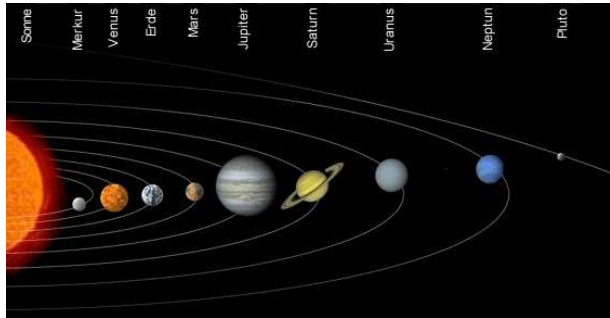


- Schale ohne Delle  $\Leftrightarrow$  Rotations**symmetrie**  $\Leftrightarrow$  konstante Winkelgeschwindigkeit  $\Leftrightarrow$  **konstanter** Drehimpuls
- Schale mit Delle  $\Leftrightarrow$  **keine** Rotations**symmetrie**  $\Leftrightarrow$  Änderung der Winkelgeschwindigkeit  $\Leftrightarrow$  **kein** konstanter Drehimpuls



# Erhaltungsgrößen bei Raumzeitsymmetrien

- Homogenität der Zeit  
Energieerhaltung
- Homogenität des Raums  
Impulserhaltung
- Isotropie des Raums  
Drehimpulserhaltung

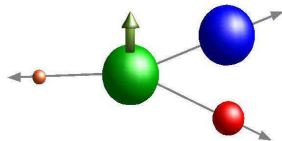


Sonnensystem

Energieerhaltung und Drehimpulserhaltung

# Relevanz der Erhaltungssätze

- Vereinfachung der Lösungsfindung  
DGLs 1. Ordnung
- neue theoretische Einsichten  
z.B. Chaos oder kein Chaos?
- Modellierung der Wechselwirkungen  
z.B.  $\beta$ -Zerfall



$\beta$ -Zerfall des Neutrons



Niels Bohr



Wolfgang Pauli

# Outline

- 1 Biographie
  - Kurzportrait
  - Familie
  - Die Erlanger Zeit: 1882 - 1915
  - Die Göttinger Zeit: 1915 - 1933
  - Die Zeit in Bryn Mawr: 1933 - 1935
- 2 **Bedeutung für die Physik**
  - Symmetrien
  - Raumzeit Symmetrien
  - **Innere Symmetrien: Das Standardmodell**
  - Das Noethersche Theorem
- 3 Epilog
  - Epilog

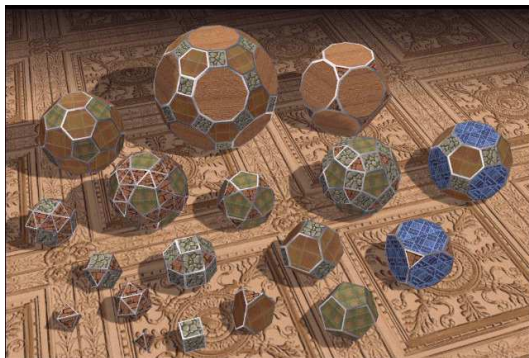
# Symmetrische Körper

## Platonische Körper

427 - 347 v. Chr.

- |   |            |        |
|---|------------|--------|
| b | Tetraeder  | Feuer  |
| c | Würfel     | Erde   |
| d | Oktaeder   | Luft   |
| e | Ikosaeder  | Wasser |
| f | Dodekaeder |        |

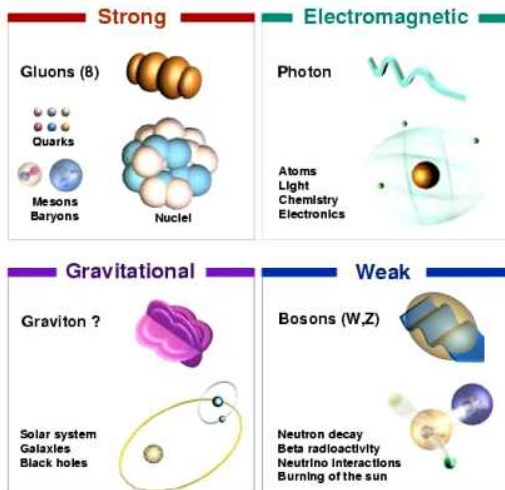
**4 Elemente**



Regelmäßige und unregelmäßige Polyhedra

# Die 4 fundamentalen Kräfte

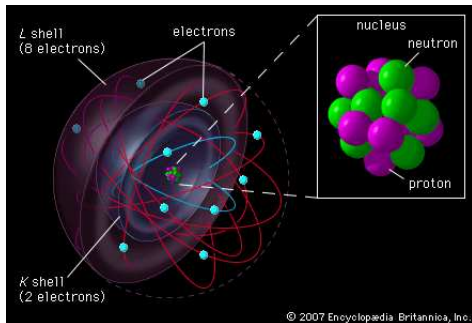
## Forces



# Atomphysik: Ladungserhaltung

elektrische Ladung  $Q$ :

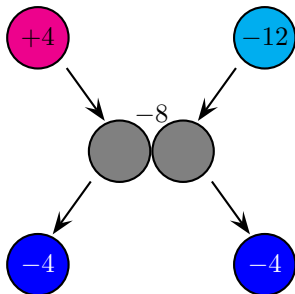
- Elektron:  
negative Ladung
- Proton:  
positive Ladung



Atommodell

# Ladungserhaltung

- Die elektrische Ladung ist insgesamt immer erhalten.
- Die zugehörige Symmetrie ist eine Phaseninvarianz:  
 $U(1)$
- Zu jedem Teilchen mit Ladung  $Q$  gibt es ein Antiteilchen mit Ladung  $-Q$ .



Ladungserhaltung im Stoß

# Kernphysik: Kernkräfte

## 2 Kernkräfte:

- starke Kernkraft**

Bindungskraft, die Protonen und Neutronen trotz Ladungsabstoßung im Kern bindet

- schwache Kernkraft**

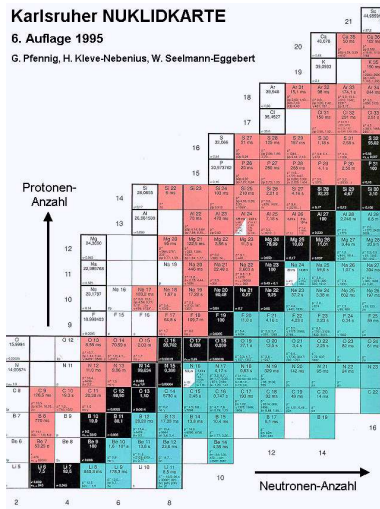
Radioaktivität

$\beta$ -Zerfall

### Karlsruher NUKLIDKARTE

6. Auflage 1995

G. Pfennig, H. Kleve-Nebenius, W. Seelmann-Eggebert



### Nuklidkarte



# Starke Kernkraft: Isospinerhaltung

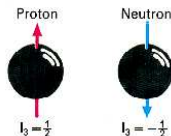
Gibt es eine Symmetrie?

Gibt es dazu Erhaltungsgrößen?

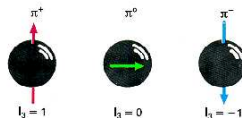


Werner Heisenberg

- **Isospin**



Nukleon: Dublett



Pion: Triplet

- **Isospinraum**

Symmetrie in einem abstrakten inneren Raum

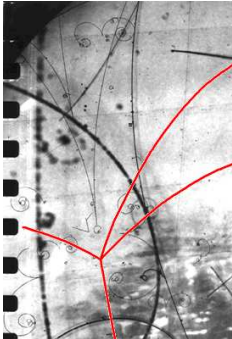
*SU(2)*

- Wechselwirkung muß so beschaffen sein, daß der Isospin eine Erhaltungsgröße ist:

**Einschränkung für die Theorie**

# Teilchenphysik: Teilchenzoo

Beschleunigerexperimente bei hohen Energien führen auf neue Teilchen:



Teilchenspuren

Wie kann Ordnung in den **Teilchenzoo** kommen?

# Strangeness: Seltsamkeit

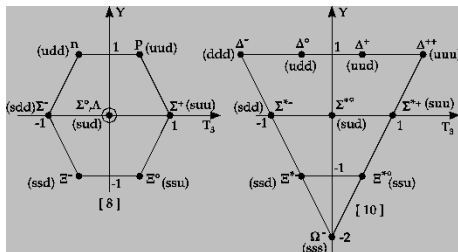
neue **Symmetrie**? neue **Erhaltungsgrößen**? neue **Ordnung**!



Murray Gell-Mann

- neue Teilchen mit **strangeness**
- neue innere Symmetrie: **flavour  $SU(3)$**

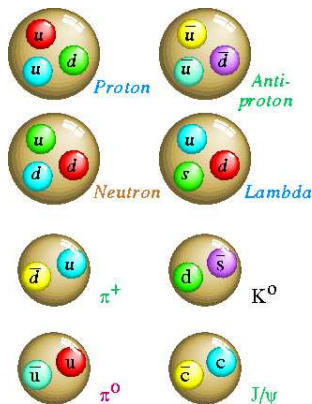
der achtfache Weg



Baryonenoktett und Baryonendekuplett

# Sind die Elementarteilchen elementar?

- Baryonen sind aus 3 Quarks zusammengesetzt
- Mesonen sind aus Quark und Antiquark zusammengesetzt
- Quarks tragen Farbe  $SU(3)$
- Baryonen und Mesonen tragen keine Farbe



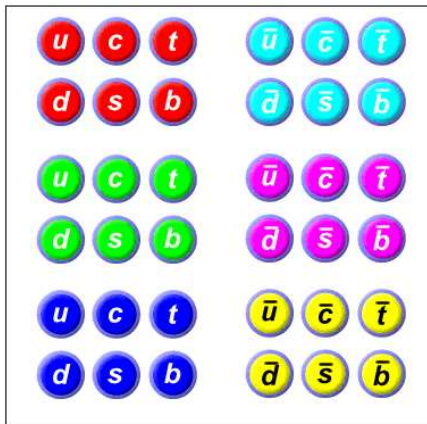
Elementarteilchen sind zusammengesetzt

# Charme, Truth and Beauty: das Quark-Modell

noch mehr Teilchen

- **flavour**  $SU(N)$ 
  - strangeness  $SU(3)$
  - charme  $SU(4)$
  - beauty
  - truth
- **colour**  $SU(3)$

und Antiteilchen



Quarks mit flavour und colour

# Standardmodell: Quarks und Leptonen

fam.	I	II	III
ladung	<b>quarks</b>		
+2/3	<b>u</b> <b>u</b> <b>u</b> up	<b>c</b> <b>c</b> <b>c</b> charm	<b>t</b> <b>t</b> <b>t</b> top
-1/3	<b>d</b> <b>d</b> <b>d</b> down	<b>s</b> <b>s</b> <b>s</b> strange	<b>b</b> <b>b</b> <b>b</b> bottom
0	<b><math>\nu_e</math></b> e-neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> $\mu$ -neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> $\tau$ -neutrino
-1	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau
	<b>leptons</b>		
massa	up 5 MeV charm 1300 MeV top 175000 MeV	down 10 MeV strange 200 MeV bottom 4500 MeV	e-neutrino 0 ? MeV $\mu$ -neutrino 0 ? MeV $\tau$ -neutrino 0 ? MeV electron 0.5 MeV muon 106 MeV tau 1777 MeV

Die Teilchen des Standardmodells

# Standardmodell: Bosonen

$$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

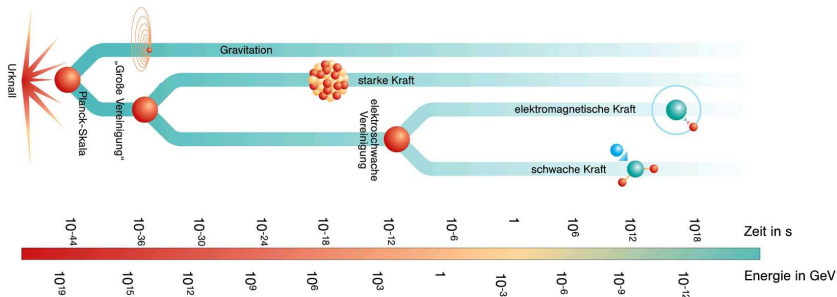
<b>BOSONS</b>			force carriers spin = 0, 1, 2, ...		
Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0	<b>g</b> gluon	0	0
$W^-$	80.4	-1			
$W^+$	80.4	+1			
$Z^0$	91.187	0			

Die Wechselwirkungsteilchen des Standardmodells

# Jenseits des Standardmodells: GUTs

- höhere Energien
- schwerere Teilchen
- größere Symmetrie

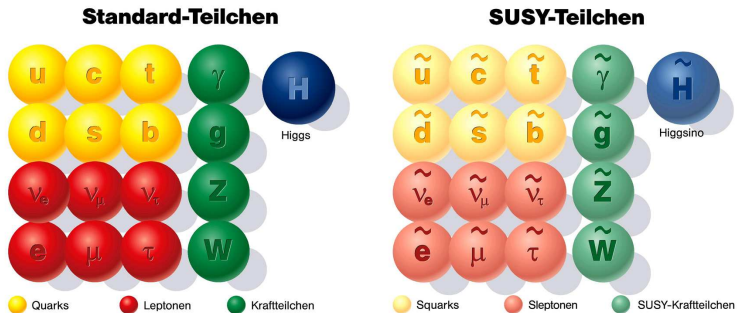
$SO(10)?$



Vereinheitlichung der Kräfte?



# Jenseits des Standardmodells: Supersymmetrie?



Supersymmetrie?

# Outline

- 1 Biographie
  - Kurzportrait
  - Familie
  - Die Erlanger Zeit: 1882 - 1915
  - Die Göttinger Zeit: 1915 - 1933
  - Die Zeit in Bryn Mawr: 1933 - 1935

- 2 **Bedeutung für die Physik**
  - Symmetrien
  - Raumzeit Symmetrien
  - Innere Symmetrien: Das Standardmodell
  - **Das Noethersche Theorem**

- 3 Epilog
  - Epilog

# Das Noethersche Theorem in der Mechanik

## Koordinatentransformation

$$q_i' = q_i'(q_1, \dots, q_s, t, \alpha), \quad q_i = q_i(q_1', \dots, q_s', t, \alpha)$$

## Lagrangefunktion

$$L(q, \dot{q}, t) = L(q(q', t, \alpha), \frac{d}{dt}q(q', t, \alpha), t) = L'(q', \dot{q}', t, \alpha)$$

$$\frac{\partial L'}{\partial \alpha} = \sum_{i=1}^s \left[ \frac{\partial L}{\partial q_i} \frac{\partial q_i(q', t, \alpha)}{\partial \alpha} + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \frac{\partial \frac{d}{dt}q_i(q', t, \alpha)}{\partial \alpha} \right]$$

$$\frac{\partial L'}{\partial \alpha} = \sum_{i=1}^s \left[ \left( \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) \frac{\partial q_i(q', t, \alpha)}{\partial \alpha} + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial q_i(q', t, \alpha)}{\partial \alpha} \right) \right]$$

$$\frac{\partial L'}{\partial \alpha} = \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^s \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \frac{\partial q_i(q', t, \alpha)}{\partial \alpha}$$

# Das Noethersche Theorem in der Mechanik

Koordinatentransformation

$$q_i' = q_i'(q_1, \dots, q_s, t, \alpha), \quad q_i = q_i(q_1', \dots, q_s', t, \alpha)$$

Lagrangefunktion sei invariant

$$L(q, \dot{q}, t) = L'(q', \dot{q}', t, \alpha) = L(q', \dot{q}', t)$$

$$0 = \left. \frac{\partial L'}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} = \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^s \left. \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \frac{\partial q_i(q', t, \alpha)}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} = 0$$

Erhaltungsgröße

$$I(q_1, \dots, q_s, \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_s, t) = \sum_{i=1}^s \left. \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \frac{\partial q_i(q', t, \alpha)}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0}$$

Zu jeder kontinuierlichen Koordinatentransformation, die die Lagrangefunktion invariant läßt, gehört eine Erhaltungsgröße.

# Outline

- 1 Biographie
  - Kurzportrait
  - Familie
  - Die Erlanger Zeit: 1882 - 1915
  - Die Göttinger Zeit: 1915 - 1933
  - Die Zeit in Bryn Mawr: 1933 - 1935
- 2 Bedeutung für die Physik
  - Symmetrien
  - Raumzeit Symmetrien
  - Innere Symmetrien: Das Standardmodell
  - Das Noethersche Theorem
- 3 Epilog
  - Epilog

# Epilog

- warmherziger Mensch
- bahnbrechende  
mathematische Erkenntnisse
- zentraler Beitrag zur  
Theoretischen Physik



# Emmy Noether: 1882 - 1935

