

# Geschichte der Mechanik (III): Die Vollendung der klassischen Mechanik, ihre Krise und die Geburt der modernen Physik



*William Rowan Hamilton*  
 (1805-1865)



*James Clerk Maxwell*  
 (1831-1879)

$$\dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial q_i}$$

$$\dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i} \quad i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = H\psi$$

$$S = k \log W$$

$$E = mc^2$$

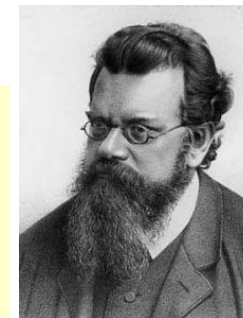
$$E = \hbar\nu$$

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \bar{q} (i\gamma^\mu D_\mu - m) q - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F_a^{\mu\nu}$$

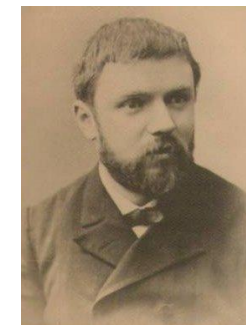
**Klaus Keller**



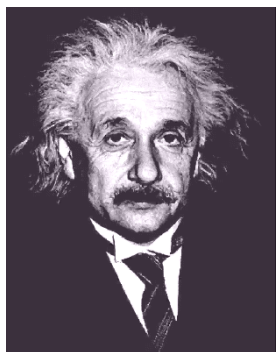
*Schrödingers Katze (tot oder nicht tot?)*



*Ludwig Boltzmann*  
 (1844-1906)



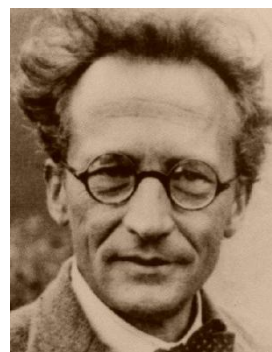
*Henri Poincaré*  
 (1854-1912)



*Albert Einstein*  
 (1879-1955)



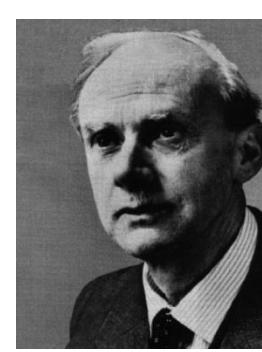
*Max Planck*  
 (1858-1947)



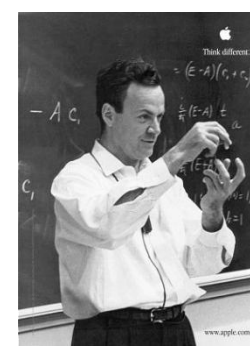
*Erwin Schrödinger*  
 (1887-1961)



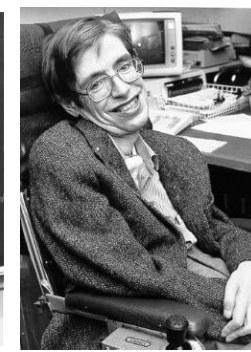
*Werner Heisenberg*  
 (1901-1976)



*Paul A.M. Dirac*  
 (1902-1984)



*Richard Feynman*  
 (1918-1988)



*Stephen Hawking*  
 (1942- )

## Geschichte der Mechanik III:

### Die Vollendung der Klassischen Mechanik, ihre Krise und die Geburt der Modernen Physik

Als der 16jährige Abiturient Max Planck, der zwischen Physik und Pianistenlaufbahn schwankte, den bekannten Münchner Professor Jolly um Rat fragte, empfahl dieser ihm, Physik *nicht* mehr zu studieren, da „alle wesentlichen Dinge bereits gefunden wären und es jetzt nur noch um das Ausfüllen unbedeutender Lücken gehe.“ Glücklicherweise wählte Max Planck dann trotzdem die Physik ... und wurde später der Vater der Quantenhypothese!

Wie konnte es zu der grotesken Fehleinschätzung dieses anerkannten Professors kommen? Dazu muss man sich die Entwicklung nach Newton vergegenwärtigen, die ein Triumphzug war, um den jede Geisteswissenschaft die Physik beneiden müsste: Nachdem Newton kurz vor 1700 die Gesetze der Punktmechanik und das Gravitationsgesetz gefunden hatte – sowie die dazu nötigen mathematischen Methoden, nämlich die Differential- und Integralrechnung, gab es kein Jahrzehnt, in dem nicht ungleich mehr Erkenntnisse gewonnen wurden, als in den 1000 Jahren Mittelalter. Euler gelang es schon wenige Jahrzehnte nach Newton, aus den Newtonschen Gesetzen die Bewegungsgleichungen für starre Körper abzuleiten. Lagrange fand eine allgemeinere und flexiblere Formulierung der Gesetze der Klassischen Mechanik. Hamilton schuf eine ungemein elegante Formulierung der Klassischen Mechanik, die es Heisenberg 90 Jahre später ermöglichte, die Gesetze der „Quantenmechanik“ zu erraten. Das 19. Jahrhundert ist aber auch durch enorme Erfolge in anderen Bereichen der Physik gekennzeichnet. Mayer, Carnot, Helmholtz stellten die Hauptsätze der Thermodynamik auf, Maxwell fand die Gesetze der Elektrodynamik. Boltzmann gelang es schließlich, die (phänomenologischen) Gesetze der Wärmelehre aus denen der Statistischen Mechanik abzuleiten. Die Newtonsche Mechanik stellte sich damit als die Grundlage der gesamten Physik heraus; ihr Gültigkeitsbereich ging offensichtlich weit über die „normale“ Erfahrungswelt hinaus. So vergaß man langsam, dass jede Theorie nur ein *Modell* für einen *eingeschränkten* Bereich der Welt darstellt und kam zur Überzeugung, dass die Newtonschen Gesetze *überall* gelten würden.

Kurz vor der Jahrhundertwende gab es jedoch einige raffinierte Experimente, deren Ergebnisse man sich nicht erklären konnte: Michelson zeigte in immer verfeinerten Experimenten um 1890, dass die Lichtgeschwindigkeit in jeder Richtung konstant ist, was aber bei einer sich bewegenden Erde in einem „Äther“ nicht denkbar war. (Auf das lange Zeit von der katholischen Kirche verfochtene Weltbild des Ptolemäos wollte niemand zurückgehen!). In eklatantem Widerspruch zur klassischen Theorie war die Energieausstrahlung eines „schwarzen Körpers“. Es gab noch einige wenige, weitere Diskrepanzen – etwa, dass – wie Poincarè zeigte – die Maxwell'schen Gleichungen eine andere Symmetrie aufweisen als die Klassische Mechanik. Oder, dass sich der gerade von Nernst gefundene 3. Hauptsatz der Wärmelehre mit den bisher so erfolgreichen Modellen nicht erklären ließ.

Alle Versuche, diese Widersprüche im Rahmen der Klassischen Physik vollständig zu lösen, scheiterten. Zwei Personen hatten schließlich den Mut, das „gänzlich Neue“ zu wagen: Einstein und Max Planck.

Einstein verwarf die Hypothese eines Äthers, in dem sich Lichtwellen fortpflanzen sollten und gab die so selbstverständliche Vorstellung eines absoluten Raumes und einer absoluten Zeit auf. Stattdessen stellte er das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit auf. Damit konnte er ganz elementar die Transformationsformeln zwischen zwei Bezugssystemen ableiten. (Diese sog. Lorentztransformationen hatte einige Jahre zuvor schon Lorentz abgeleitet – allerdings mit falschen Annahmen.) Und Einstein konnte folgern, dass Energie und Masse äquivalent sind:  $E = m c^2$

Zehn Jahre nach dieser Revolution in der Physik gelang es Einstein, die Gravitation als Effekt einer Raum-Zeit-Krümmung zu interpretieren, was zur „Allgemeinen Relativitätstheorie“ führte. Die merkwürdigen Effekte der speziellen Relativitätstheorie (Zeitdilatation, Längenkontraktion, Vergrößerung der Masse bei Bewegung) sind heute vielfach experimentell gesichert. (Das Nobelpreiskomitee getraute sich jedoch nicht, Einstein für seine Relativitätstheorie den Nobelpreis zu verleihen, er bekam ihn für seine Lichtquanten-hypothese.)

Während der erste Durchbruch die Grenzen der Klassischen Physik in Richtung großer Geschwindigkeiten verschob, beschäftigt sich die Quantentheorie mit der Bewegung von atomaren Teilchen. Zunächst gelang es Max Planck, die korrekten Formeln für die Energieausstrahlung eines Schwarzen Körpers zu erraten. Um diese Formeln theoretisch abzuleiten, stellte Planck seine „Quantenhypothese“ auf, wonach Energieaustausch nicht in beliebigen Mengen, sondern in Vielfachen eines Elementarquantums  $\hbar$  erfolgt. Diese „halbklassische Quantenmechanik“ hatte einige Erfolge, konnte aber die grundsätzlichen Probleme nicht lösen. Dies gelang erst 1925 Heisenberg und Schrödinger durch völlig unterschiedliche Überlegungen. Ähnlich wie Einstein fragte sich Heisenberg, welche Konzepte der Klassischen Physik in der zu findenden „Quantenmechanik“ gültig bleiben könnten. Seine Schlussfolgerungen stellten sich letztlich als noch revolutionärer als die von Einstein heraus: der Begriff der „Bahn“ verlor seinen Sinn, physikalische Größen nehmen einen wohldefinierten Wert nur nach einer Messung ein, die Kausalität wird durch eine Wahrscheinlichkeitsinterpretation ersetzt. Schrödinger suchte nach einer Wellengleichung für die von De Broglie postulierten Materiewellen. Diese partielle Differentialgleichung lieferte erstaunlicherweise die gleichen Ergebnisse wie die Heisenbergsche Matrizenmechanik. Bald konnte gezeigt werden, dass beide Theorien mathematisch äquivalent sind und zu einem physikalisch und philosophisch radikal neuen Weltbild führen. In den folgenden Jahren konnte diese „Quantenmechanik“ zur „Relativistischen Quantenmechanik“ und dann zur „Relativistischen Quantenfeldtheorie“ erweitert werden. Speziell die „Quantenelektrodynamik“ ist die am genauesten überprüfte Theorie in den Naturwissenschaften.

In den beiden letzten Jahrzehnten konnte mit dem „Standardmodell der Elementarteilchenphysik“ eine Verallgemeinerung der Quantenelektrodynamik auf Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungskräfte formuliert werden. Auch hier hat sich bisher kein Widerspruch zwischen Theorie und Experiment gezeigt. Allerdings stört die große Anzahl der zu bestimmenden Konstanten. Aus diesem Grund probiert man eine Beschreibung mit „Supersymmetrien“ oder „Stringtheorien“.

Hat man jetzt – nach 2500 Jahren Mechanik – erkannt, „was die Welt im Innersten zusammen hält“? Nein, denn Allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik widersprechen sich unterhalb der sog. Planck-Länge, die etwa  $10^{-35}$  m ist, also noch um viele Größenordnungen kleiner als die Elementarteilchenausdehnungen. Alle Versuche einer „Quantengravitationstheorie“ sind bis jetzt gescheitert bzw. im Stadium von Spekulationen (etwa „Schleifenquantengravitation“, „Raum-Zeit-Quantisierung“). Der Traum ist natürlich eine „*Theory of Everything*“, eine Weltformel, die alle Kräfte und alle Teilchen beschreibt. Vielleicht wird man eine solche Theorie auch nie überprüfen können, weil dafür unvorstellbare Energien nötig sein dürften.

Im Gegensatz zu „Geschichte der Mechanik I“ und der ersten Hälfte von „Geschichte der Mechanik II“ (Anfänge bei den Griechen bis Galilei) werden in „Geschichte der Mechanik III“ ernsthafte Kenntnisse in Mathematik benötigt, denn Relativitätstheorie und Quantenmechanik sollen in ihren Grundzügen vorgestellt werden.

Ein Einstieg in die Veranstaltung – auch für spezielle Themen – ist immer möglich. Es besteht die Gelegenheit, zu einem begrenzten Thema einen Seminarvortrag (Dauer etwa 30 Minuten) zu halten. (Dafür kann man 3 *Credit points*“ erwerben.)

Zum bisherigen Stoff gibt es ein sehr ausführlich Skriptum und eine CD mit sehr vielen Bildern, Karten und Musik.