

Kurze Geschichte der klassischen Physik und wichtige Vertreter

Autor: Norbert Marxer

Erstellung: 28.12.2025 (Version 1)

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Inhaltsverzeichnis | 1 |
| Einleitung | 4 |
| Übersicht | 5 |
| Der wissenschaftliche Prozess | 6 |
| Übersicht über wichtige Experimente und Beobachtungen | 9 |
| Historische Entwicklung | 9 |
| Physikerinnen und Physiker | 9 |
| Zeitleisten | 9 |
| SdW, "Die 10 bahnbrechendsten physikalischen Entdeckungen" | 9 |
| Jönsson/Fässler, "Die Top Ten der schönsten physikalischen Experimente" | 10 |
| Die Auswahl | 12 |
| Kriterien | 12 |
| Auswahl | 12 |
| Antike | 13 |
| Kurzgeschichte der Physik in der Antike | 13 |
| 1. Einleitung | 13 |
| 2. Vorsokratische Naturphilosophie (ca. 600–450 v. Chr.) | 13 |
| 3. Klassische Periode (ca. 450–320 v. Chr.) | 14 |
| 4. Hellenistische Physik (ca. 320–30 v. Chr.) | 15 |
| 5. Römische und spätantike Physik (1.–5. Jh. n. Chr.) | 15 |
| 6. Charakteristische Merkmale der antiken Physik | 16 |
| 7. Bedeutung für die Geschichte der Physik | 16 |
| Anaximander von Milet (ca. 610–546 v. Chr.) | 17 |
| Aristoteles (384–322 v. Chr.) | 18 |
| Archimedes von Syrakus (ca. 287–212 v. Chr.) | 19 |
| Eratosthenes von Kyrene (ca. 276–194 v. Chr.) | 20 |

| | |
|---|----|
| Mechanik und Gravitation | 21 |
| Kurze Geschichte der klassischen Mechanik | 21 |
| 1. Einleitung | 21 |
| 2. Frühe Vorstellungen von Bewegung (Antike bis Mittelalter) | 21 |
| 3. Galilei und die Geburt der modernen Mechanik | 21 |
| 4. Newton und die mathematische Formulierung der Mechanik | 22 |
| 5. Mechanik im 18. Jahrhundert: Von der Kraft- zur Energieformulierung | 22 |
| 6. Lagrange und die analytische Mechanik | 22 |
| 7. Hamilton und die Formulierung als Dynamisches System | 23 |
| 8. Anwendungen und Bedeutung bis heute | 23 |
| 9. Fazit | 23 |
| Galileo Galilei (1564–1642) | 24 |
| Robert Hooke (1635–1703) | 25 |
| Isaac Newton (1642–1727) | 26 |
| Henry Cavendish (1731–1810) | 27 |
| Optik | 28 |
| Kurze Geschichte der klassischen Optik | 28 |
| 1. Optik in der Antike: Von der Philosophie zur Geometrie | 28 |
| 2. Optik im arabisch-islamischen Mittelalter: Die Geburt der modernen Optik | 28 |
| 3. Renaissance und frühe Neuzeit: Vom Lichtstrahl zur brechenden Linse | 29 |
| 4. Die wissenschaftliche Optik der Klassik: Wellen vs. Teilchen | 29 |
| 5. Die Optik im 19. Jahrhundert: Der endgültige Sieg der Wellen | 29 |
| 6. Maxwell und die Vereinigung von Licht und Elektromagnetismus | 30 |
| 7. Das Ende der klassischen Optik: Experimente, die zum Umdenken zwangen | 30 |
| 8. Fazit | 30 |
| Alhazen (Ibn al-Haytham, 965–1040) | 31 |
| Christiaan Huygens (1629–1695) | 32 |
| Isaac Newton (1642–1727) | 33 |
| Thomas Young (1773–1829) | 34 |
| Augustin-Jean Fresnel (1788–1827) | 35 |
| Wärmelehre | 36 |
| Kurze Geschichte der klassischen Wärmelehre | 36 |
| 1. Einleitung: Von der Sinneserfahrung zur Naturwissenschaft | 36 |
| 2. Erste Vorstellungen: Antike und Mittelalter | 36 |
| 3. Die Geburt der modernen Wärmelehre: 17. Jahrhundert | 36 |
| 4. Die Caloric-Theorie im 18. Jahrhundert | 36 |
| 5. Revolution durch Experimente: 18.–19. Jahrhundert | 37 |
| 6. Die Formulierung der Hauptsätze der Thermodynamik | 37 |
| 7. Die kinetische Gastheorie: Von Clausius zu Maxwell und Boltzmann | 38 |
| 8. Abschluss des klassischen Zeitalters | 38 |
| 9. Schlussbemerkung | 38 |
| Robert Boyle (1627–1691) | 39 |
| Sadi Carnot (1796–1832) | 40 |
| James Prescott Joule (1818–1889) | 41 |
| Rudolph Clausius (1822–1888) | 42 |
| Ludwig Boltzmann (1844–1906) | 43 |

| | |
|--|--------|
| Elektrizitätslehre | 44 |
| Kurze Geschichte der klassischen Elektrodynamik | 44 |
| 1. Einleitung | 44 |
| 2. Frühgeschichte: Von antiken Kenntnissen bis zum 17. Jahrhundert | 44 |
| 3. Elektrizität und Magnetismus im 18. Jahrhundert | 44 |
| 4. Der Beginn der modernen Elektrodynamik: Ørsted, Ampère und Faraday | 45 |
| 5. Maxwells Revolution: Die Vereinigung von Elektrizität, Magnetismus und Licht | 45 |
| 6. Die Bestätigung elektromagnetischer Wellen: Hertz und die Geburtsstunde der Funktechnik | |
| 7. Mathematische Struktur der Maxwellschen Theorie | 46 |
| 8. Die klassische Elektrodynamik und die Relativitätstheorie | 46 |
| 9. Technologische Folgen der Elektrodynamik | 46 |
| 10. Abschluss | 46 |
| William Gilbert (1544–1603) | 47 |
| Charles-Augustin de Coulomb (1736–1806) | 48 |
| Luigi Galvani (1737–1798) | 49 |
| Alessandro Volta (1745–1827) | 50 |
| Hans Christian Ørsted (1777–1851) | 51 |
| Michael Faraday (1791–1867) | 52 |
| James Prescott Joule (1818–1889) | 53 |
| James Clerk Maxwell (1831–1879) | 54 |
| Heinrich Hertz (1857–1894) | 55 |
| Albert A. Michelson und Edward Morley | 56 |
| Anhang | 57 |
| Anhang A Quellen | 58 |

Einleitung

Der **Titel des Vortrags** lautete ...

Bahnbrechende Beobachtungen und Experimente der klassischen Physik von Anaximander (610-546 BCE) bis Heinrich Hertz (1857-1894)

Es ist natürlich völlig undenkbar, alle wichtigen Beobachtungen und Experimente für jedes Gebiet der Physik - Mechanik, Gravitation, Optik, Wärmelehre, Elektrizitätslehre und viele mehr - lückenlos aufzulisten, geschweige denn zu besprechen.

Um dieser Vielfalt gerecht zu werden, wurde der folgende Weg gewählt. Für jedes Gebiet ...

- wird eine kurze historische Übersicht gegeben und
- die wichtigsten Vertreter / Experimentatoren / Beobachter werden kurz mit ihren herausragenden Leistungen vorgestellt.

Warum starten wir mit Anaximander?

Wir starten mit Anaximander, weil er als einer der Väter der Naturwissenschaften angesehen wird. Carlo Rovelli hat dies in seinem Buch "Die Geburt der Wissenschaft - Anaximander und sein Erbe" ausführlich erläutert. So schreibt er:

*Er war der Erste, der die Bewegung der Gestirne rational studierte und versuchte, sie in einem geometrischen Modell wiederzugeben. Er war auch der Erste, von dem man weiss, dass er die Erde in Bewegung durch den Raum begriff. Von ihm ging die Bezeichnung der Welt als Kosmos und ihre Erfassung als ein planvoll geordnetes Ganzes aus und damit die Idee, dass die Welt auch ohne Rückgriff auf Götter verständlich und erklärbar ist - eine **Revolution des Denkens**. Anaximander entwarf das Programm, aus dem sich bis heute der westliche Wissenschaftsansatz entwickelt.*

Und warum hören wir mit Heinrich Hertz auf?

Wir hören mit Heinrich Hertz auf, weil er mit seiner Entdeckung der elektromagnetischen Wellen quasi am Abschluss der klassischen Physik (Mechanik, Elektrizitätslehre, Thermodynamik) steht und die grundlegenden Entdeckungen der modernen Physik seit 1900 eine separate Behandlung und Betrachtung verdienen.

Übersicht

In diesem Kapitel geben wir eine kurze Übersicht über den Inhalt des Skripts. Eine gute Übersicht gibt auch das Inhaltsverzeichnis.

Im Kapitel “**Der wissenschaftliche Prozess**” gehen wir näher auf die wissenschaftliche Methode mit den Schritten ...

- Beobachtung, Fragestellung, Hypothese, Experiment, Datenauswertung, Schlussfolgerung, eventuelle Anpassung der Hypothese ...

ein. Wichtige Punkte beim wissenschaftlichen Prozess sind ...

- Reproduzierbarkeit, Transparenz, Objektivität und Falsifizierbarkeit.

Wir diskutieren auch die verschiedenen Arten von Experimenten ...

- Demonstrationsexperimente, Schüler- bzw. Praktikumsversuche, Mess- oder quantitative Experimente, qualitative Experimente, kontrollierte Experimente, Vergleichsexperimente, Feldexperimente (Outdoor), Simulationsexperimente, Big Science (mit grossen Teams), Gedankenexperimente.

Zum Erkenntnisgewinn tragen auch reine Beobachtungen bei (v.a. in der Antike).

Im Kapitel “**Übersicht über wichtige Experimente und Beobachtungen**” erläutern wir, wie wir auf die wichtigsten Experimente kommen können. Wir listen eine Vielzahl von (v.a. Wikipedia)-Links ...

- zur historischen Entwicklung der Physik und der physikalischen Experimente
- zu wichtigen Physikern und Physikerinnen
- zu Zeitleisten über die Physik, Wissenschaft, Erfindungen und vieles mehr

Ausserdem stellen wir zwei Listen mit herausragenden physikalischen Experimenten dar, die ...

- in der Zeitschrift “Spektrum der Wissenschaften” bzw.
- im Buch “Die Top Ten der schönsten physikalischen Experimente” von Claus Jönsson und Armand Fässler

beschrieben worden sind.

Im nächsten Kapitel “**Die Auswahl**” listen wir einige Kriterien, die zu unserer Auswahl der wichtigsten Experimente geführt haben.

In den nachfolgenden Kapiteln haben wir den folgenden Aufbau gewählt. Nach einer kurzen historischen Einführung zur Epoche bzw. zum physikalischen Bereich (um die Bedeutung der Experimente besser einordnen zu können) beschreiben wir die Leistungen mehrerer Physiker in dieser Epoche bzw. in jenem Gebiet. Die Auswahl ist subjektiv (und vorläufig). Und mit grosser Sicherheit sind einige Physiker, die es verdient gehabt hätten, übersehen worden. Es resultieren die folgenden Kapitel.

| | |
|---------------------------------------|---|
| Kapitel “ Antike ” | mit Anaximander, Aristoteles, Archimedes, Eratosthenes |
| Kapitel “ Mechanik ” | mit Galilei, Hooke, Newton, Cavendish |
| Kapitel “ Optik ” | mit Alhazen, Huygens, Newton, Young, Fresnel |
| Kapitel “ Wärmelehre ” | mit Boyle, Carnot, Joule, Boltzmann |
| Kapitel “ Elektrizitätslehre ” | mit Gilbert, Coulomb, Galvani, Volta, Ørsted, Faraday, Joule, Hertz, Michelson/Morley |

Der wissenschaftliche Prozess

Bevor wir uns daran machen, die (möglichst) wichtigsten Beobachtungen und Experimente der Physik auszuwählen, ist es naheliegend, sich ein wenig mit dem wissenschaftlichen Prozess auseinanderzusetzen.

Die **wissenschaftliche Methode** ist ein systematisches Vorgehen, mit dem Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Fragen über die Natur beantworten und neues Wissen gewinnen. Sie sorgt dafür, dass Erkenntnisse nachvollziehbar, überprüfbar und objektiv sind.

Physikalische Experimente sind geplante Untersuchungen, bei denen man Naturerscheinungen gezielt beobachtet, misst oder nachstellt, um physikalische Gesetzmässigkeiten zu erkennen oder zu überprüfen.

Die Methode läuft gemäss den folgenden Schritten ab ...

- **Beobachtung**
 - Man bemerkt ein Phänomen oder ein Problem.
 - z.B. Je steiler die Rampe, desto schneller rollt der Ball hinunter.
- **Fragestellung**
 - Aus der Beobachtung entsteht eine präzise wissenschaftliche Frage.
 - z.B. Wie beeinflusst die Neigung der Rampe die Geschwindigkeit des Balls?
- **Hypothese**
 - Man formuliert eine vorläufige Erklärung oder Vorhersage, die getestet werden kann.
- **Experiment:** Man plant und führt ein Experiment durch, um die Hypothese zu prüfen ...
 - Kontrollierte Bedingungen: Man verändert nur eine Variable, während alle anderen konstant bleiben: z.B. Rampenwinkel.
 - Messungen: Grössen wie Zeit, Strecke, Masse usw. werden möglichst genau gemessen und mit ihren Fehlergrenzen angegeben.
 - Reproduzierbarkeit: Andere Personen sollen das Experiment unter gleichen Bedingungen wiederholen können und ähnliche Ergebnisse erhalten.
- **Datenauswertung:**
 - Die gemessenen Daten werden analysiert, oft grafisch dargestellt, verglichen und statistisch ausgewertet.
- **Schlussfolgerungen:**
 - Mit Hilfe einer Fehleranalyse wird entschieden, ob die Hypothese bestätigt oder widerlegt ist.
- **Wenn nötig:**
 - Hypothese anpassen und erneut testen – Wissenschaft ist ein fortlaufender Prozess.

Wichtige Punkte des wissenschaftlichen Prozesses sind ...

- **Reproduzierbarkeit:** Andere müssen das Experiment mit gleichen Ergebnissen wiederholen können.
- **Transparenz:** Methoden und Daten müssen offen dokumentiert sein.
- **Objektivität:** Ergebnisse dürfen nicht von persönlichen Meinungen abhängen.
- **Falsifizierbarkeit:** Eine Hypothese muss prinzipiell widerlegbar sein.

Die Wissenschaft ist immer auf der Suche nach der besten Erklärung. Wenn eine alte "Weisheit" über Bord geworfen werden muss, dann ist es nicht ein schlechtes Zeichen, sondern ein Zeichen dafür, dass der Wissenschaftsprozess funktioniert.

Das Experiment spielt dabei eine entscheidende Rolle: Beispielsweise lautet das Motto des Labors von Heike Kamerlingh Onnes (Link):

„Door meten tot weten“ – „Durch Messen zum Wissen“

Es gibt **verschiedene Arten von physikalischen Experimenten**, die sich nach Ziel, Aufbau, Methode oder Ort unterscheiden. Hier sind die wichtigsten zum Teil überlappenden Kategorien ...

- Demonstrationsexperimente
 - Werden oft im Unterricht oder in Vorlesungen gezeigt.
 - Ziel: Phänomene anschaulich machen.
 - Beispiel: Ein Laserstrahl, der an einem Prisma gebrochen wird.
- Schüler- bzw. Praktikumsversuche
 - Experimente, die Lernende selbst durchführen.
 - Ziel: Eigenständiges Arbeiten und Verständnis fördern.
 - Beispiel: Stromkreis mit Batterie, Lampe und Schalter.
- Mess- oder quantitative Experimente
 - Es werden Messwerte erfasst, um Größen zu bestimmen oder Gesetze zu überprüfen.
 - Beispiel: Bestimmung der Federkonstante mit Hilfe des Hooke'schen Gesetzes.
- Qualitative Experimente
 - Nur das Phänomen selbst wird betrachtet, ohne quantitative Messungen.
 - Beispiel: Beobachtung, wie sich ein Magnet auf Eisenfeilspäne auswirkt.
- Kontrollierte bzw. Vergleichsexperimente
 - Eine oder mehrere Varianten werden gegenübergestellt.
 - Beispiel: Untersuchen, wie die Pendellänge die Schwingungsdauer beeinflusst.
- Feldexperimente (Outdoor)
 - Experimente ausserhalb des Labors, unter realen Umweltbedingungen.
 - Beispiel: Schallausbreitung im Freien messen.
- Computereperimente
 - Physikalische Vorgänge werden durch Computerprogramme simuliert.
 - Besonders nützlich für sehr grosse, gefährliche oder komplexe Systeme.
 - Beispiel: Simulation von Planetenbahnen oder Teilchenkollisionen.

- Big Science (Grossexperimente)
 - Sehr grosse, oft internationale Forschungsanlagen.
 - Beispiel: Teilchenexperimente am CERN oder astronomische Beobachtungen.
- Gedankenexperimente
 - Nur in Gedanken wird ein physikalisches Phänomen analysiert (und zum Teil auf einen logischen Widerspruch geführt).
 - Bekannte Beispiele sind die Gedankenexperimente von Galileo Galilei und Albert Einstein.

Zum Erkenntnisgewinn können neben Experimenten auch gezielte Beobachtungen, die schon seit der Antike stattgefunden haben, beitragen.

Übersicht über wichtige Experimente und Beobachtungen

Wie finden wir die wichtigsten physikalischen Experimente, Beobachtungen und Entdeckungen? Dazu können wir verschiedene Quellen durchsuchen. Beispielsweise ...

Historische Entwicklung

Auf Wikipedia gibt es eine Vielzahl an guten Quellen (auf deutsch und englisch) über die Geschichte der Physik, der Wissenschaften allgemein oder der Technik ...

- https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Physik
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Physik>
- https://de.wikipedia.org/wiki/Kategorie:Physikalisches_Experiment
- https://de.wikipedia.org/wiki/Kategorie:Physikalisches_Demonstrationsexperiment
- https://en.wikipedia.org/wiki/Category:Physics_experiments

Physikerinnen und Physiker

Es gibt eine diesbezügliche Liste ...

- https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_bedeutender_Physiker

Für die moderne Physik dient auch die Liste der **Nobelpreisträger** und (leider wenigen) Nobelpreisträgerinnen ...

- https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreistr%C3%A4ger_f%C3%BCr_Physik

Zeitleisten

Um uns einen guten Überblick über die chronologische Entwicklung der Physik zu verschaffen, können wir uns auch die verschiedenen **Zeitleisten** (engl. timelines) anschauen. Beispielsweise ...

- https://de.wikipedia.org/wiki/Zeittafel_physikalischer_Entdeckungen
- https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_timelines#Physics
- https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_timelines#Science
- https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_historic_inventions
- https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_electromagnetism_and_classical_optics
- https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_thermodynamics
- https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_fundamental_physics_discoveries

SdW, “Die 10 bahnbrechendsten physikalischen Entdeckungen”

Im Jahre 2015 erschien im Spektrum der Wissenschaften der Bericht “Die 10 bahnbrechendsten physikalischen Entdeckungen - Unzählige Experimente haben zum Wissensstand der modernen Physik beigetragen. Die folgenden waren besonders richtungsweisend.” von Janosch Deeg.

- <https://www.spektrum.de/wissen/die-10-bahnbrechendsten-physikalischen-entdeckungen/1330689>

Darin sind die folgenden Top 10 Entdeckungen aufgeführt ...

| | |
|--|----------------------------------|
| ■ Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen (1887) | Heinrich Hertz |
| ■ Doppelspaltexperiment (1807) | Thomas Young |
| ■ Spektralanalyse (1859) | Robert Kirchhoff / Robert Bunsen |
| ■ Elektromagnetische Induktion (1831) | Michael Faraday |
| ■ Nachweis des Higgs-Bosons (2012) | Large Hadron Collider |
| ■ Entdeckung des Atomkerns (1909) | Ernest Rutherford |
| ■ Michelson-Morley-Experiment (1881/1887) | Michelson / Morley |
| ■ Halbleitertechnik: Der erste Transistor (1947) | Bardeen / Shockley / Brattain |
| ■ Stimulierte Emission von Licht - Laser (1960) | Theodore Maiman |
| ■ Entdeckung der Radioaktivität (1896) | Henri Becquerel |

Jönsson/Fässler, “Die Top Ten der schönsten physikalischen Experimente”

Im Jahre 2002 führte die Zeitschrift “Physics World” eine Umfrage betreffend die Top Ten der schönsten physikalischen Experimente durch...

- <https://physicsworld.com/a/the-most-beautiful-experiments-in-physics-as-chosen-by-real-physicists/>

Es gab dabei 200 Rückmeldungen. Das am häufigsten genannte Experiment (20 x) war das Doppelspaltexperiment mit Elektronen, das im Jahre 1959 von Claus Jönsson durchgeführt wurde.

Im Jahre 2005 gaben dann Claus Jönsson und Armand Fässler ein Buch mit dem Titel “Die Top Ten der schönsten physikalischen Experimente” heraus ...

- <https://www.amazon.de/Die-Top-sch%C3%B6nsten-physikalischen-Experimente/dp/3499616289>

Auf amazon.de heisst es zu diesem Buch (Gabi Neumayer) ...

*Schönheit in der Physik? Für die meisten Wissenschaftler ist Schönheit tatsächlich ein wichtiges Kriterium bei ihrer Arbeit. Einfache Formeln für komplexe Phänomene, Erkennen von Symmetrie: All das spielte und spielt in den Wissenschaften eine bedeutende Rolle. Und so hat die englische Zeitschrift **Physics World** **2002** eine Wahl durchgeführt. Gesucht: das schönste physikalische Experiment aller Zeiten. Die Top Ten dieses Schönheitswettbewerbs finden Sie in diesem Buch.*

Die Umfrage ergab die folgende Reihenfolge ...

- Claus Jönsson: Young’s double-slit experiment applied to the interference of single electrons (1959)
- Galileo’s experiment on falling bodies (1600s)
- Millikan’s oil-drop experiment (1910s)
- Newton’s decomposition of sunlight with a prism (1665–1666)
- Young’s light-interference experiment (1801)
- Cavendish’s torsion-bar experiment (1798)
- Eratosthenes’ measurement of the Earth’s circumference (3rd century BC)
- Galileo’s experiments with rolling balls down inclined planes (1600s)
- Rutherford’s discovery of the nucleus (1911)
- Foucault’s pendulum (1851)

Ausserdem erwähnt wurden ...

- Archimedes' experiment on hydrostatics
- Roemer's observations of the speed of light
- Joule's paddle-wheel heat experiments
- Reynolds's pipe flow experiment
- Mach & Salcher's acoustic shock wave
- Michelson–Morley measurement of the null effect of the ether
- Röntgen's detection of Maxwell's displacement current
- Oersted's discovery of electromagnetism
- The Braggs' X-ray diffraction of salt crystals
- Eddington's measurement of the bending of starlight
- Stern–Gerlach demonstration of space quantization
- Schrödinger's cat thought experiment
- Trinity test of nuclear chain reaction
- Wu et al.'s measurement of parity violation
- Goldhaber's study of neutrino helicity
- Feynman dipping an O-ring in water

Die Auswahl

Kriterien

Bei der Auswahl der wichtigsten Experimente können unterschiedliche Kriterien angewendet werden.
Beispielsweise: Diese Experimente ...

- widerlegen alte Weltbilder,
- markieren wissenschaftliche Wendepunkte,
- bilden die Grundlage neuer Physik,
- ermöglichen völlig neue Theorien,
- bringen neue Technologien hervor und
- verändern unser Weltverständnis dauerhaft.

Auswahl

In den folgenden Kapiteln werden neben einigen kurzen historischen Abrissen über die Entwicklung der Physik in den Gebieten ...

- Mechanik und Gravitation,
- Optik,
- Wärmelehre und
- Elektrizitätslehre

auch noch kurze Lebensläufe und die wichtigsten Experimente und Erkenntnisgewinne hervorragender Persönlichkeiten aufgeführt.

Viele Physiker haben (vor allem in der Antike) auf verschiedenen Gebieten gearbeitet. Heutzutage ist dies auf Grund der hohen Spezialisierung kaum mehr möglich.

Das Inhaltsverzeichnis vorne gibt eine anschauliche Übersicht über die Entwicklung und die ausgewählten Physiker.

Antike

Kurzgeschichte der Physik in der Antike

1. Einleitung

Die Physik in der Antike bildet die Frühphase jener wissenschaftlichen Tradition, aus der sich später die moderne Naturwissenschaft entwickelte. In der Antike existierte die **Physik** nicht als eigenständige Disziplin im heutigen Sinn; sie **war Teil der Naturphilosophie**. Ziel war es, grundlegende Ordnungsprinzipien der Welt zu verstehen – Bewegung, Materie, Raum, Zeit, kosmische Strukturen und natürliche Veränderungen. Die Entwicklung der antiken Physik beginnt im 6. Jahrhundert v. Chr. in ionischen Städten Kleinasiens, entfaltet sich im klassischen Griechenland, systematisiert sich in der hellenistischen Epoche und wird schliesslich in der römischen Welt tradiert und kommentiert.

2. Vorsokratische Naturphilosophie (ca. 600–450 v. Chr.)

2.1 Die Ionische Schule

Die ersten physikalischen Ideen stammen von den sogenannten Vorsokratikern ...

- **Thales** von Milet postulierte Wasser als Urstoff. Wichtig war weniger der Inhalt als die Idee, dass die Natur durch ein rationales Prinzip erklärbar ist.
- **Anaximander** führte das Apeiron, das Unbegrenzte, als Ursprung aller Dinge ein. Bedeutsam sind seine kosmologischen Modelle, z. B. die Vorstellung der Erde als frei im Raum schwebender Körper.
- **Anaximenes** erklärte natürliche Prozesse durch Verdichtung und Verdünnung von Luft – ein erster Ansatz einer quantitativen Theorie.

Damit entsteht der Gedanke, dass Naturgesetze auf allgemeinen mechanischen oder materiellen Prinzipien beruhen.

2.2 Heraklit und die Lehre des Wandels

Heraklit beschreibt die Natur als **ständigen Wandel** („panta rhei“). Die Vorstellung der Spannung zwischen Gegensätzen (warm–kalt, feucht–trocken) beeinflusst spätere physikalische Systematisierungen, etwa die Elementenlehre der Griechen.

2.3 Parmenides und die Eleaten

Parmenides hingegen vertritt ein statisches Seinsprinzip: **Bewegung ist Illusion**. Diese radikale Position provozierte später die Auseinandersetzungen über Raum, Zeit und Bewegung und förderte die mathematische Behandlung physikalischer Probleme.

2.4 Die Atomisten

Die bedeutendste vorsokratische physikalische Theorie ist der **Atomismus** ...

- Leukipp und verstärkt **Demokrit** postulierten Atome im leeren Raum.
- Alle Eigenschaften der Materie lassen sich auf Grösse, Form und Anordnung der Atome zurückführen.
- Bewegung entsteht rein mechanisch, ohne Zweckursachen.

Der Atomismus wurde im Mittelalter weitgehend verworfen, entfaltete aber in der Neuzeit enorme Wirkung und gilt als eine der ersten mechanistischen Naturtheorien.

3. Klassische Periode (ca. 450–320 v. Chr.)

3.1 Pythagoreer und mathematische Physik

Die **Pythagoreer** betrachteten die Natur als Fundament aus **Zahlen und Proportionen**. Ihre Beiträge ...

- mathematische Behandlung von Schwingungen und Musik (Harmonielehre),
- frühe Ideen zur Geometrie des Kosmos,
- Einfluss auf Platon, der Mathematik zum Zugang zur Natur erhebt.

3.2 Platon

Platon selbst entwickelt keine experimentelle Physik, doch seine Ideen prägen die spätere Entwicklung

...

- Kosmos als rational geordnetes System (Timaios),
- Einführung idealisierter geometrischer Modelle für Elemente und Bewegungen.
- Die Idee einer von mathematischen Harmonieprinzipien bestimmten Welt bereitete den Boden für astronomische Theorien wie die des Eudoxos.

3.3 Aristoteles – Systematisierer der Natur

Aristoteles ist der dominierende Naturphilosoph der Antike. Wesentliche Beiträge ...

- Vier-Elemente-Lehre (Erde, Wasser, Luft, Feuer).
- Zwei Bewegungsarten: **natürliche Bewegung** (z. B. Fallen schwerer Körper) und **erzwungene Bewegung** (z. B. Wurf).
- Die Geschwindigkeit erzwungener Bewegung sei proportional zur treibenden Kraft und umgekehrt proportional zum Widerstand des Mediums.
- Unterscheidung zwischen **sublunarem** (veränderlichem) und **superlunarem** (perfekt-kreisförmig) Bereich.
- Einführung der Begriffe Aktualität und Potentialität als Erklärung physikalischer Veränderungen.
- Aristoteles entwarf ein kohärentes, qualitatives Weltbild von hoher Erklärungskraft, das bis in die frühe Neuzeit bestimmend blieb.

3.4 Aristarch, Eudoxos und die Mathematiker

Neben Aristoteles entwickelten andere Denker mathematische **kosmologische Modelle** ...

- **Eudoxos** entwickelte mit seinen **homozentrischen Sphären** ein frühes mathematisches Versuchssystem zur Erklärung komplexer Bewegungen.
- **Aristarch** von Samos schlug ein **heliozentrisches System** vor – eine der erstaunlich modern wirkenden Ideen der Antike, allerdings ohne breiten Einfluss.

4. Hellenistische Physik (ca. 320–30 v. Chr.)

4.1 Alexandrinische Schule

Nach Alexander dem Großen entstand in Alexandria ein wissenschaftliches Zentrum, in dem Physik eine stärker experimentelle und mathematische Ausrichtung erhielt. **Eratosthenes** vollbrachte eine Meisterleistung mit der Bestimmung des Erdumfangs.

4.2 Mechanik und Statik

Wichtige Beiträge ...

- **Archimedes** formulierte die Grundlagen der Hydrostatik (Archimedisches Prinzip), entwickelte eine mathematische Behandlung der Hebelgesetze und fertigte bedeutende Schriften zur Kräftegleichgewichtslehre.
- **Heron** von Alexandria mit experimentellen Untersuchungen zu Druck, Pneumatik, Automaten und Wärme.
- **Ktesibios** Studien zu Druckluft, Pumpen, Hydraulik.
- Zum ersten Mal wird Physik teilweise technisch-experimentell betrieben.

4.3 Epikureischer Atomismus

Epikur übernimmt Demokrits **Atomismus**, ergänzt aber die Annahme eines kleinen „**atomaren Abweichens**“ (clinamen), um Freiheit und spontane Ereignisse zu erklären.

Lucretius verbreitete diese Ideen im römischen Reich. Der Atomismus blieb eine Alternative zum aristotelischen Weltbild.

4.4 Optik

Es entstehen erste Teilphysiken mit klar mathematischem Charakter ...

- **Euklid** entwickelte geometrische Optik, insbesondere Theorie der Lichtgeraden und Perspektive.
- **Ptolemäus** untersuchte systematisch Brechung, Reflexion und Sehen.

5. Römische und spätantike Physik (1.–5. Jh. n. Chr.)

5.1 Römische Naturphilosophie

Die **Römer** trugen weniger neue Theorien bei, waren jedoch wichtige Vermittler und Kommentatoren. Bedeutend sind ...

- **Seneca**: naturkundliche Beobachtungen, meteorologische und optische Phänomene.
- **Vitruv**: technische Anwendungen physikalischer Prinzipien in Architektur und Maschinenbau.

5.2 Galen und medizinisch-physikalische Konzepte

Galen, obwohl Mediziner, beeinflusste Vorstellungen über Körpermechanik, Strömungslehre im Organismus und Wärmelehre. Seine Lehren dominierten bis weit ins Mittelalter.

5.3 Spätantike Kommentatoren

Philosophen wie Johannes **Philoponos** kritisierten aristotelische Mechanik. Philoponos' Idee des Impetus, einer Kraft, die einem Projektil mitgegeben wird, beeinflusste mittelalterliche Physik und weist auf das Trägheitsprinzip hin.

6. Charakteristische Merkmale der antiken Physik

6.1 Qualitative statt quantitative Physik

Die antike Physik basierte überwiegend auf qualitativer Erklärung ...

- Elemente, natürliche Orte, Zweckursachen.

Ausnahmen bilden die Arbeiten der Mathematiker (Optik, Statik, Astronomie).

6.2 Bedeutung der Geometrie

Viele physikalische Erfolge der Antike entstanden aus geometrischer Abstraktion, z. B. bei Optik oder Himmelsmechanik.

6.3 Dualität zweier Traditionen

Die Rivalität zwischen ...

Aristotelisch-qualitativer Physik und

Atomistisch-mechanistischer Physik

prägte das Denken bis in die frühe Neuzeit (Galilei, Newton).

6.4 Übergang zur experimentellen Methodik

Im Hellenismus entstanden erste Ansätze systematischer Experimente ...

Pneumatik, Hydraulik, Statik, Optik.

Alexandria war das Zentrum dieser Entwicklung.

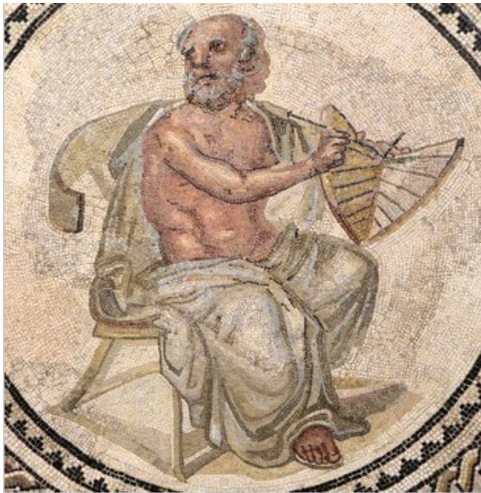
7. Bedeutung für die Geschichte der Physik

Die antike Physik war nicht „falsch“, sondern ein früher Versuch, Naturphänomene ohne Mythen zu erklären. Ihre Leistungen sind insbesondere ...

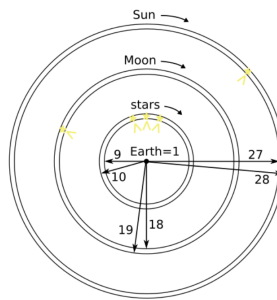
- Einführung eines rationalen, erklärbaren Weltbildes,
- mathematische Durchdringung von Natur (Optik, Astronomie, Statik),
- erste mechanistische Theorien (Atomismus),
- systematische Klassifikation von Bewegungen (Aristoteles),
- frühe experimentelle Methodik (alexandrinische Schule).

Sie ist das Fundament, auf dem die mittelalterliche Hochschulphysik und später die naturwissenschaftliche Revolution des 17. Jahrhunderts aufbauten.

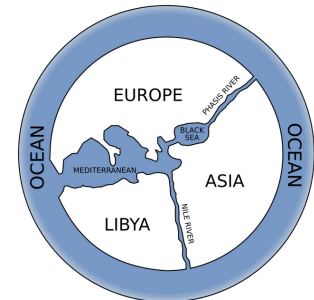
Anaximander von Milet (ca. 610–546 v. Chr.)



Anaximander



Kosmologie



(mögliche) Weltkarte

Anaximander von Milet (ca. 610–547 v. Chr., Link) war einer der bedeutendsten frühen vorsokratischen Philosophen und gilt als Schlüsselfigur für die Entstehung naturphilosophischen Denkens im antiken Griechenland. Als Schüler und Nachfolger von Thales (ca. 624–546 v. Chr., Link) suchte er nach einer **rationalen Erklärung für natürliche Prozesse, ohne sich auf mythologische Erzählungen zu stützen**. Er verfasste eines der ersten bekannten prosaischen Werke der Naturforschung („Über die Natur“) und schuf damit einen **Grundstein für systematische wissenschaftliche Fragestellungen**. Seine Arbeiten umfassten Astronomie, Kosmologie, Geographie und frühe Physik.

Leistungen

- Physikalisch bedeutsam ist Anaximander vor allem durch seine Vorstellung des „**Apeiron**“, des unbegrenzten Urstoffes, aus dem alle Dinge hervorgehen und in den sie zurückkehren. Auch wenn dies keine physikalische Theorie im modernen Sinn ist, markiert die Idee einen entscheidenden Schritt zur **Abstraktion**: Naturvorgänge sollten durch allgemeine Prinzipien erklärt werden, nicht durch personifizierte Götter.
- Anaximander war der Erste, der die **Erde als frei schwebenden Körper im Raum** dachte, stabil ohne Stütze – ein Meilenstein für das Verständnis von Gleichgewicht und Symmetrievorstellungen.
- Zudem entwickelte er ein frühes **Modell des Himmels** als konzentrische Ringe und
- erklärte **meteorologische Vorgänge** (Regen, Wind, Blitz) durch natürliche Ursachen.
- Auch seine **kartografischen** Arbeiten, darunter eine der ersten Weltkarten, hatten indirekt physikalische Bedeutung, weil sie eine systematische räumliche Erfassung der Welt ermöglichten.

Naturvorgänge sollten durch allgemeine Prinzipien erklärt werden, nicht durch personifizierte Götter.

Aristoteles (384–322 v. Chr.)



Aristoteles



Buch Physik



Buch Metaphysik

Aristoteles (384–322 v. Chr., Link) war Schüler Platons, Lehrer Alexanders des Grossen und einer der einflussreichsten Denker der gesamten Geistesgeschichte. Er begründete umfassende Systeme in Logik, Biologie, Ethik und Politik, vor allem aber **prägte er das physikalische Denken der Antike und des Mittelalters** wie keiner seiner Zeitgenossen. Durch die systematische Sammlung und Ordnung naturkundlicher Beobachtungen schuf er eine frühe Form wissenschaftlicher Methodik. Seine Schriften „**Physik**“ und „**Über den Himmel**“ wurden über 1500 Jahre hinweg massgebliche Referenztexte. Obwohl viele seiner physikalischen Theorien später ersetzt werden mussten, waren ihre Grundideen bahnbrechend. Aristoteles ...

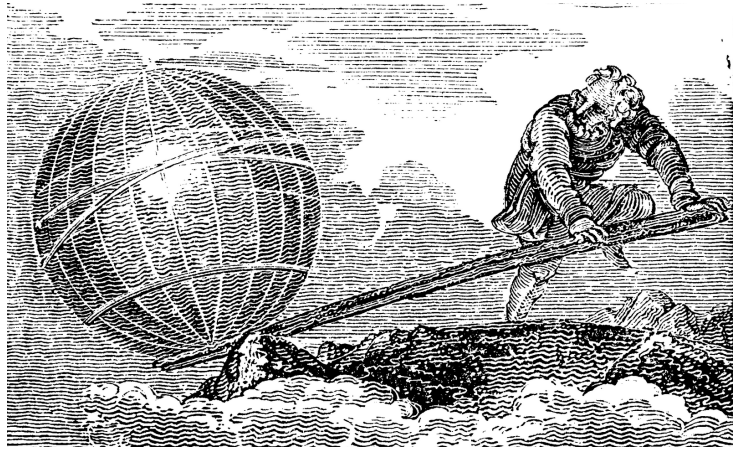
- definierte Bewegung, Raum, Zeit und Kausalität neu und suchte nach übergeordneten Prinzipien der Natur.
- Er unterschied zwischen **natürlicher Bewegung** (z. B. das Herabfallen schwerer Körper) und **erzwungener Bewegung**, ein Konzept, das das mechanische Denken bis in die Renaissance prägte.
- Er übernahm und erweiterte das **geozentrische Weltbild** und erklärte die kosmische Ordnung durch perfekte **Kreisbewegungen** im Himmel.
- Seine Vorstellung, dass jedes physikalische Ereignis durch **vier Arten von Ursachen** beschrieben werden müsse, war für die Struktur wissenschaftlicher Erklärungen lange wegweisend.
- Aristoteles führte zudem Überlegungen zur **Kontinuumsmechanik**, zur **Optik** (vor allem zur Lichtausbreitung) sowie zur **Akustik** an und untersuchte die Eigenschaften von Medien und Elementen.
- Auch wenn moderne Physik vieles revidierte, bildete Aristoteles' System die Grundlage für spätere wissenschaftliche Revolutionen.

Sein Modell der natürlichen und erzwungenen Bewegung prägte die Wissenschaft bis ins Mittelalter.

Archimedes von Syrakus (ca. 287–212 v. Chr.)



Archimedes



Hebelpunkt (Link)

Archimedes von Syrakus (ca. 287–212 v. Chr., Link) war einer der grössten **Mathematiker**, **Physiker** und **Ingenieure** der Antike sowie der erste **theoretische Physiker** im modernen Sinn und Begründer der Mechanik als Wissenschaft. Als Gelehrter im hellenistischen Zeitalter verband er präzise theoretische Überlegungen mit experimenteller Beobachtung – eine seltene Kombination in dieser Epoche. Seine Arbeiten prägten Mechanik, Hydrostatik, Geometrie und Technik grundlegend und beeinflussten die Wissenschaften über zwei Jahrtausende hinweg.

Archimedes war berühmt für seine mathematischen Beweise, seine aussergewöhnlichen geometrischen Analysen und seine Erfindungen, darunter militärische Maschinen, Pumpen und Hebevorrichtungen.

Zu seinen bahnbrechenden physikalischen Leistungen zählt ...

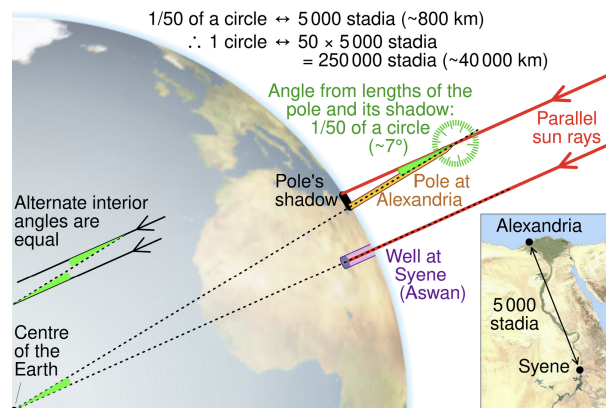
- insbesondere die Formulierung des **Archimedischen Prinzips**: dass ein Körper in einer Flüssigkeit eine **Auftriebskraft** erfährt, die gleich gross ist wie das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit: Der berühmte “Eureka”-Moment.
- Er benutzte den Auftrieb auch für **Dichtemessungen**. Berühmt ist die Anekdote über die Vermessung einer Goldkrone.
- Mit diesem Prinzip begründete er die **Hydrostatik** als eigenständigen Zweig der Physik.
- Daneben formulierte er die **Hebelgesetze** und entwickelte ein systematisches Verständnis des **mechanischen Gleichgewichts** – seine berühmte überlieferte Aussage „Gib mir einen Punkt, und ich hebe die Erde aus den Angeln“ bezieht sich direkt darauf.
- Archimedes schuf zudem frühe Ansätze zur Berechnung von Schwerpunktlagen und legte Grundlagen der **Statik**.
- Seine **technischen Konstruktionen**, darunter die Archimedische Schraube und raffinierte Katapulte, zeigen seine Fähigkeit, physikalische Prinzipien praktisch umzusetzen.
- Seine Methoden der Flächen- und Volumenbestimmung wurden später als Vorläufer der **Integralrechnung** angesehen und beeinflussten die moderne mathematische Physik massgeblich.

Der Auftrieb eines Körpers in einer Flüssigkeit ist gleich dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit.

Eratosthenes von Kyrene (ca. 276–194 v. Chr.)



Eratosthenes



Bestimmen des Erdumfangs

Eratosthenes von Kyrene (ca. 276–194 v. Chr.) war ein Universalgelehrter: Mathematiker, Geograph, Astronom, Historiker und Bibliothekar der berühmten Bibliothek von Alexandria. Er gilt als **Begründer der wissenschaftlichen Geographie** und war einer der ersten, der naturwissenschaftliche Messmethoden systematisch einsetzte. Seine interdisziplinäre Arbeitsweise verband Beobachtung, mathematische Berechnung und kritische Quellenprüfung. Unter seiner Leitung wurde die Bibliothek zu einem Zentrum für Forschung und Dokumentation.

Seine bedeutendste physikalische Leistung ...

- ist zweifellos die **Messung des Erdumfangs**. Mit Hilfe einfacher geometrischer Überlegungen, der Beobachtung der Sonnenstände in Syene und Alexandria sowie der Annahme paralleler Sonnenstrahlen berechnete er den Erdumfang mit erstaunlicher Genauigkeit – eine der grössten wissenschaftlichen Leistungen der Antike.
- Damit zeigte er, dass quantitative Methoden physikalische Aussagen über die Welt ermöglichen.
- Eratosthenes entwickelte ausserdem ein System von **Breiten- und Längengraden** und legte damit die Grundlage für spätere Navigations- und Kartografie-Techniken.
- Auch seine Messung der **Neigung der Erdachse** war bemerkenswert präzise.
- Neben seinen geophysikalischen Arbeiten beschäftigte er sich mit Chronologie, mathematischer Primzahlforschung (Sieb des Eratosthenes) und optisch-astronomischen Methoden.
- Seine Fähigkeit, geometrische Prinzipien zur Beschreibung realer physikalischer Grössen anzuwenden, macht ihn zu einem Vorläufer der modernen Physik.

Mit Hilfe geometrischer Prinzipien lässt sich der Erdumfang berechnen.

Mechanik und Gravitation

Kurze Geschichte der klassischen Mechanik

1. Einleitung

Die **klassische Mechanik** bildet eines der ältesten und grundlegendsten Teilgebiete der Physik. Sie beschreibt die **Bewegung von Körpern**, die **Wirkung von Kräften** und die **grundlegenden Prinzipien**, nach denen physikalische Systeme ihren zeitlichen Verlauf entwickeln.

Von den ersten Überlegungen der antiken Naturphilosophie über die mathematische Formulierung durch Newton bis zur analytischen Mechanik des 18. und 19. Jahrhunderts entwickelte sich die Mechanik zu einem hochpräzisen, universellen Werkzeug zur Beschreibung der makroskopischen Welt.

Noch heute bildet sie das **Fundament vieler ingenieurwissenschaftlicher Anwendungen**, der Himmelsmechanik, der Technischen Mechanik und zahlreicher Bereiche der modernen Physik.

Dieser Kurzbericht zeichnet die historische Entwicklung nach, erläutert die zentralen Konzepte und zeigt, wie diese Theorie zu einem einheitlichen, mathematisch konsistenten System heranwuchs.

2. Frühe Vorstellungen von Bewegung (Antike bis Mittelalter)

Die Entstehung der Mechanik beginnt mit den Naturphilosophen der griechischen Antike. Besonders prägend waren die Überlegungen von **Aristoteles**, der zwischen natürlicher und erzwungener Bewegung unterschied. Nach seiner Auffassung streben alle Körper ihrem natürlichen Ort zu: leichte Körper nach oben, schwere nach unten. Er glaubte ausserdem, dass eine konstante Bewegung nur bestehen könne, wenn dauerhaft eine Kraft wirkt – eine Vorstellung, die die Entwicklung der Mechanik über Jahrhunderte prägte. Erst im Hellenismus wurde diese Sicht infrage gestellt.

Archimedes legte mit seiner Theorie der **Statik** und seiner Untersuchung des **Hebels** die ersten exakt begründeten Gesetze mechanischer Zusammenhänge vor. Seine Formulierungen gelten als erste mathematisch-physikalische Theorien überhaupt.

Im Mittelalter bereiteten Philosophen wie **Buridan** oder **Oresme** den Übergang zur Impulserhaltung vor. Buridan entwickelte das Konzept des impetus, einer Vorstufe des Impulses, und argumentierte, dass ein Körper seine Bewegung beibehalte, wenn keine entgegenwirkende Kraft vorhanden sei. Diese Ideen setzten sich jedoch erst in der Renaissance und im wissenschaftlichen Umbruch des 16. und 17. Jahrhunderts vollständig durch.

3. Galilei und die Geburt der modernen Mechanik

Galileo Galilei gilt als eigentlicher Begründer der modernen Bewegungslehre. Durch systematische Experimente – insbesondere mit **schiefen Ebenen und fallenden Körpern** – widerlegte er die aristotelische Vorstellung, dass schwere Körper schneller fallen als leichte. Er erkannte, dass alle Körper im Vakuum gleich schnell fallen und dass **Beschleunigung** ein zentraler Begriff der Bewegungsanalyse ist.

Von grosser Bedeutung war seine Entdeckung des **Trägheitsprinzips**: Ein Körper setzt seine Bewegung unverändert fort, wenn keine äussere Kraft wirkt. Diese Einsicht war ein entscheidender Schritt hin zur späteren Formulierung des ersten Newtonschen Gesetzes. Galilei schuf zudem die **kinematischen Grundgleichungen**, etwa die mathematische Beschreibung der gleichmässig beschleunigten Bewegung.

Auch seine Arbeiten zur **Parabelbahn** von geworfenen Körpern und zur **relativen Bewegung** (insbesondere seine Schiff-Analogie) schufen die Grundlagen für die späteren Konzepte der Bezugssysteme und transformierten Bewegungen.

4. Newton und die mathematische Formulierung der Mechanik

Den endgültigen Durchbruch zur klassischen Mechanik brachte **Isaac Newton** mit dem 1687 erschienenen Werk **Philosophiae Naturalis Principia Mathematica**. Darin verbindet er die Erkenntnisse von Galilei mit einer konsequent mathematischen Beschreibung und leitet aus drei Axiomen ein vollständig geschlossenes System ab.

Die **drei Newtonschen Axiome** ...

| | |
|------------------------|---|
| Trägheitssatz | Ein Körper bleibt in Ruhe oder in gleichförmiger Bewegung, solange keine resultierende Kraft auf ihn wirkt. |
| Aktionsprinzip | $F = m a$ Die Beschleunigung eines Körpers ist proportional zur einwirkenden Kraft und umgekehrt proportional zur Masse. |
| Wechselwirkungsprinzip | Actio = Reactio d.h. Kräfte treten immer paarweise auf. |

Damit gelang Newton die erste universell gültige mathematische Formulierung der **Bewegungsgesetze**.

Hinzu kam das **Gravitationsgesetz**, das die Bewegung von Himmelskörpern erklärt und damit die Himmelsmechanik mit der Mechanik irdischer Körper verbindet. Newton zeigte, dass die Planetenbahnen Kepler'schen Gesetzen folgen, weil sie sich aus dem Gravitationsgesetz ergeben. **Damit wurde die Mechanik zur umfassenden Theorie für das gesamte Universum.**

5. Mechanik im 18. Jahrhundert: Von der Kraft- zur Energieformulierung

Im 18. Jahrhundert wurde die Mechanik mathematisch weiterentwickelt, insbesondere durch die Werke von Euler, d'Alembert und Lagrange. **Euler** führte die heutige Notation der Vektoren und Bewegungsgleichungen ein. **D'Alembert** formulierte den nach ihm benannten Satz, der dynamische Probleme auf statische zurückführt und damit viele Berechnungen vereinfachte.

Eine entscheidende Entwicklung war die Einführung des Energiebegriffs. **Leibniz** definierte die vis viva („lebendige Kraft“), die der späteren kinetischen Energie entspricht. Nach Kontroversen mit Newton-Anhängern setzte sich im 18. Jahrhundert die Erkenntnis durch, dass Energie eine fundamentale Erhaltungsgrösse ist, die unabhängig von Kräften systematisch behandelt werden kann. Diese Erkenntnis bildete die Grundlage für die späteren Theorien der Wärmelehre und Elektrodynamik.

6. Lagrange und die analytische Mechanik

Joseph-Louis Lagrange führte 1788 mit seinem Werk *Mécanique analytique* eine revolutionäre Darstellung der Mechanik ein. Anstelle von Kräften verwendete er die Prinzipien der virtuellen Arbeit und der stationären Wirkung. Die **Lagrange-Gleichungen** erlauben eine allgemeine Behandlung komplexer Systeme, indem sie nur noch skalare Grössen benötigen und auf ein einheitliches **Variationsprinzip** zurückgeführt werden.

Dieses Verfahren ist besonders nützlich für Systeme mit Zwangsbedingungen, Mehrkörpermechanismen und generalisierten Koordinaten. **Die Lagrangesche Mechanik bildet bis heute den theoretischen Standard in der theoretischen Physik und ist unverzichtbar in Bereichen wie Quantenmechanik, Relativitätstheorie und Feldtheorien.**

7. Hamilton und die Formulierung als Dynamisches System

Im 19. Jahrhundert entwickelte **William Rowan Hamilton** die Mechanik weiter zu einem hochabstrakten, aber äusserst fruchtbaren formalen System. Sein Prinzip der **stationären Wirkung** fasst alle Bewegungsgesetze in einer einzigen Variationsgleichung zusammen. Die Hamilton-Funktion (die Energie des Systems in geeigneten Koordinaten) erlaubt es, die Dynamik auf ein System von Differentialgleichungen erster Ordnung zu reduzieren.

Die hamiltonsche Formulierung bildet die Grundlage vieler moderner Ansätze, ...

- der Quantenmechanik (via kanonische Quantisierung),
- der statistischen Physik (Phasenraum),
- der Teilchenphysik und
- der nichtlinearen Dynamik.

Damit endet die Entwicklung der klassischen Mechanik im 19. Jahrhundert in einem formal äusserst eleganten und universell anwendbaren Theoriesystem.

8. Anwendungen und Bedeutung bis heute

Auch wenn die klassische Mechanik heute in bestimmten Bereichen durch die Relativitäts- und Quantenmechanik ersetzt wurde, bleibt sie in der Praxis das wichtigste physikalische Theoriegebäude für ...

- Ingenieurwissenschaften,
- Maschinenbau, Bauphysik, Statik,
- Fahrzeug- und Flugzeugtechnik,
- Astronomie und Raumfahrt,
- Robotik und biomechanische Modellierung und
- Sportwissenschaft und Medizinische Technik.

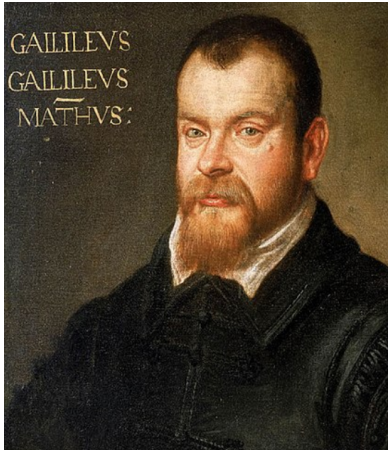
Sie bleibt gültig für Geschwindigkeiten, die deutlich kleiner als die Lichtgeschwindigkeit sind, und für Körper, deren Abmessungen gross gegenüber atomaren Skalen sind. Für die meisten technischen Anwendungen ist sie daher vollständig ausreichend.

9. Fazit

Die klassische Mechanik hat sich über mehr als zwei Jahrtausende von ersten qualitativen Vorstellungen zu einem hochpräzisen, mathematisch einheitlichen Theoriesystem entwickelt. Sie bildet bis heute das Fundament vieler Natur- und Ingenieurwissenschaften. Von Aristoteles' frühen, teils fehlerhaften Überlegungen über Galileis experimentelle Revolution, Newtons mathematische Codierung der Naturgesetze bis hin zu den abstrakten, eleganten Formulierungen von Lagrange und Hamilton zeigt die Geschichte, wie eng die Entwicklung der Physik mit der Entwicklung mathematischer Methoden verknüpft ist. Trotz der Weiterentwicklungen der modernen Physik bleibt die klassische Mechanik unentbehrlich – als Werkzeug, als Ausgangspunkt und als historische Grundlage unseres physikalischen Weltbildes.

Bemerkung: wir sind bei den Vorträgen zur klassischen Mechanik auf die theoretisch anspruchsvolleren Lagrange- und Hamilton-Formulierungen nicht eingegangen.

Galileo Galilei (1564–1642)



Galileo Galilei



Original Geneigte Ebene (Link)

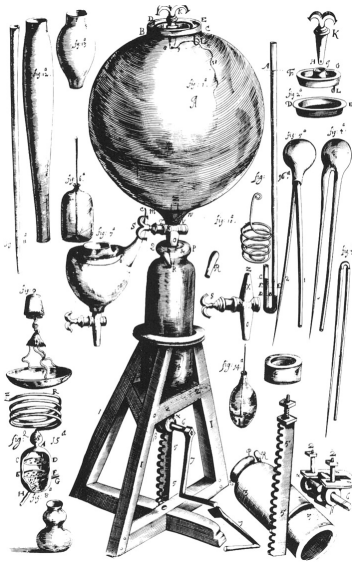
Galileo Galilei (1564–1642, Link) gilt als einer der **Begründer der modernen Naturwissenschaften**, insbesondere durch seine konsequente Verbindung von **mathematischer** Analyse, **experimenteller** Methode und physikalischer **Theorie**. Schon während des Studiums wandte er sich verstärkt der Mathematik und Physik zu und begann, die aristotelische Naturphilosophie kritisch zu hinterfragen.

Galileo revolutionierte die Physik, ...

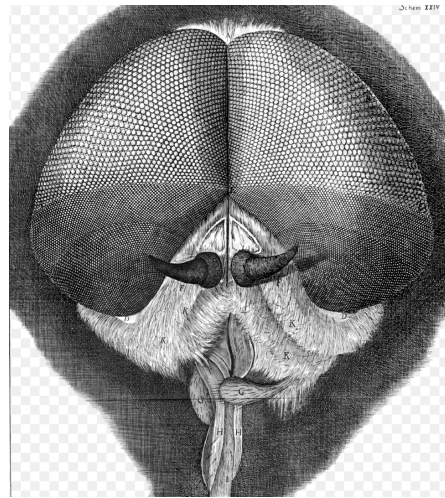
- indem er **Mechanik** und **Bewegungslehre** erstmals quantitativ formulierte.
- Mit **schiefen Ebenen, Pendelversuchen und Zeitmessung** durch Wasseruhren ermittelte er die **Fallgesetze** und erkannte, dass sich frei fallende Körper mit **gleichmässig beschleunigter Bewegung** bewegen. Damit wurden die aristotelischen Fallgesetze (schwere Körper fallen schneller) widerlegt.
- Er unterschied klar zwischen Bewegung und Kraftursache, was den **Bruch mit Aristoteles** markierte.
- Besonders bedeutend war seine Entdeckung des **Trägheitsprinzips**, das später Newton übernahm und mathematisch ausformte.
- Durch seine **teleskopischen Entdeckungen** – darunter die Jupitermonde, Mondberge und Sonnenflecken – lieferte er starke empirische Unterstützung für das kopernikanische Weltbild und trug massgeblich zur Durchsetzung eines neuen physikalisch-astronomischen Weltbildes bei.
- Galileos Konflikt mit der Kirche, der 1633 in einem Inquisitionsprozess endete, zeigte die Sprengkraft seiner naturwissenschaftlichen Argumentation. Trotz seines Hausarrests arbeitete er weiter und veröffentlichte **Dialoge über die Mechanik, die zum Fundament der klassischen Physik wurden**.
- Seine stärkste wissenschaftliche Leistung liegt in der **Etablierung der experimentellen Methode, der mathematischen Beschreibung physikalischer Gesetzmässigkeiten** und der Einführung eines neuen Denkstils, der Wissenschaft von dogmatischer Philosophie löste und auf Beobachtung und Überprüfung gründete.
- Mit Galileo beginnt die moderne Wissenschaft, denn er verwandelte Fragen nach dem ‚Warum‘ in Fragen nach dem ‚Wie‘.

Zitat von Galileo Galilei: „Messen, was messbar ist, und messbar machen, was es noch nicht ist.“

Robert Hooke (1635–1703)



Pneumatic Engine



Micrographia (1665)

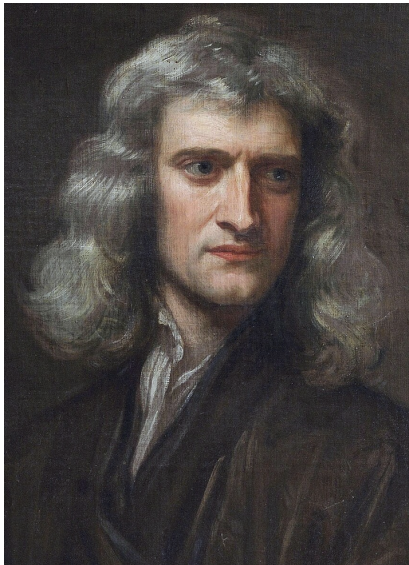
Robert Hooke (1635–1703, Link) war einer der vielseitigsten Wissenschaftler des 17. Jahrhunderts: Physiker, Biologe, Erfinder, Architekt und einer der zentralen Akteure der Royal Society in London. Nach Studium in Oxford wurde er Kurator der Royal Society und damit verantwortlich für die Organisation und Durchführung zahlreicher Experimente, die ihn zu einer zentralen Figur im wissenschaftlichen Leben Englands machten.

Hookes physikalische Beiträge sind äusserst weitreichend.

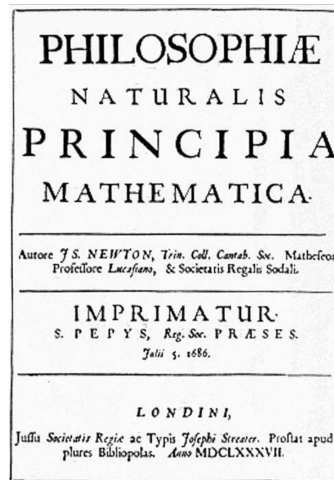
- Sein berühmtestes Gesetz, das **Hooke'sche Gesetz**, beschreibt die lineare Beziehung zwischen Kraft und elastischer Deformation von Federn und elastischen Körpern.
- Damit begründete er die **Elastizitätstheorie** und schuf wichtige Grundlagen für Mechanik, Materialwissenschaft und Schwingungslehre.
- Gleichzeitig entwarf er (unabhängig von Huygens) ein Modell der **Uhrhemmung**, das für die Entwicklung präziser Pendel- und Federuhren entscheidend war und technologische Durchbrüche ermöglichte.
- In der Optik lieferte Hooke bedeutende Erkenntnisse, etwa zur **Wellenstruktur des Lichts**, die er in einem berühmten Konflikt mit Newton vertrat.
- Sein Werk **Micrographia** (1665) gilt als Meilenstein der Wissenschaftsgeschichte, da es mikroskopische Strukturen erstmals systematisch dokumentierte und den Begriff „Zelle“ prägte.
- Auch in der **Astronomie** war Hooke aktiv; er beobachtete die Rotation des Jupiters und versuchte, die Parallaxe von Sternen zu messen. Seine mechanischen Arbeiten, u. a. zur Theorie der Gravitation und Planetenbewegung, zeigen bemerkenswerte Tiefe; manche Historiker sehen in ihnen Vorläufer von Ideen, die Newton später vollständig ausarbeitete.
- Hooke bleibt eine Schlüsselfigur der frühmodernen Physik, auch wenn sein Ruf lange durch Konflikte mit Newton überschattet war.

Die Kraft und Auslenkung eines elastischen Körpers sind linear zueinander: $F = k s$

Isaac Newton (1642–1727)



Newton



Principia (1687)

$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

Gravitationsgesetz

Isaac Newton (1642–1727, Link) gehört zu den einflussreichsten Wissenschaftlern der Menschheitsgeschichte. Während seines Studiums an der Universität Cambridge und in einer intensiven Schaffensperiode während der Pestjahre 1665–1666 entwickelte Newton grundlegende Konzepte, die später zur Formulierung seiner bahnbrechenden Theorien führten.

Newtons bedeutendste Leistungen liegen in der klassischen Mechanik, der Gravitationstheorie, der Optik und der Mathematik.

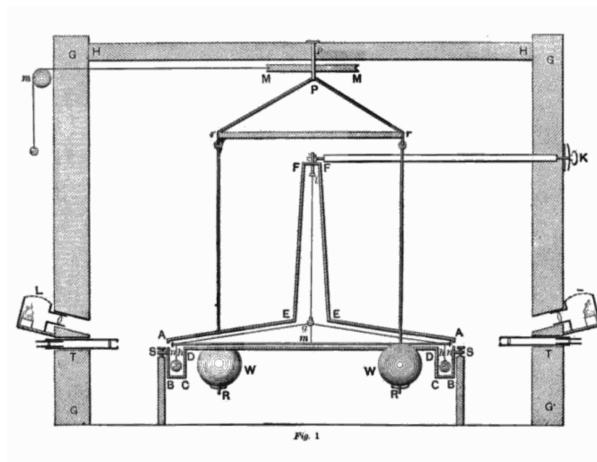
- Sein Hauptwerk **Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica** (1687) formuliert die **Bewegungsgesetze** und das **Gravitationsgesetz**, die erstmals alle Bewegungen im Kosmos einheitlich erklären.
- Newton zeigte, dass Keplers Planetenbahnen aus der Gravitation folgen und erklärte sowohl Gezeiten als auch Pendelbewegungen und die Präzession der Mondbahn. Damit schuf er einen physikalischen Rahmen, der bis in die Moderne gültig blieb.
- Newton zeigte, dass irdische und himmlische Mechanik denselben Gesetzen folgen – ein revolutionärer Schritt in der Physikgeschichte.
- Ebenso bahnbrechend waren seine optischen Forschungen: Er entdeckte, dass **weisses Licht aus Spektralfarben** (Spektroskopie) besteht, erklärte **Dispersion im Prisma** und entwickelte das **Reflexionsfernrohr**, das chromatische Aberration vermeidet.
- Newton vertrat die Ansicht, dass **Licht aus Korpuskeln** besteht. Die Welleneigenschaften konnte er allerdings nicht erklären. Das heutige Photon (gemäß dem Welle/Teilchen Dualismus) hat mit den Korpuskeln von Newton nichts zu tun.
- In der Mathematik begründete Newton (parallel zu Leibniz) die **Infinitesimalrechnung**, formulierte die Binomialreihe und entwickelte Methoden, die heute Grundwerkzeuge der Physik sind.
- **Newtons physikalische Weltsicht prägte über zwei Jahrhunderte die gesamte Wissenschaft**; seine Synthese aus Experiment, Mathematik und universellen Gesetzmässigkeiten gilt als Geburtsstunde der modernen Physik.

Irdische Objekte und Himmelskörper folgen den gleichen Gesetzen.

Henry Cavendish (1731–1810)



Cavendish



Cavendish-Experiment (1798)

Henry Cavendish (1731–1810, Link) war ein exzentrischer, äusserst präziser und methodischer britischer Naturforscher, dessen Arbeiten zu Elektrizität, Chemie und Gravitation von grundlegender Bedeutung für die moderne Physik wurden. Er veröffentlichte nur einen Bruchteil seiner Forschung, war aber einer der genauesten Experimentatoren seiner Zeit, dessen Arbeiten nach seinem Tod zum Schatz der Wissenschaftsgeschichte wurden.

Cavendishs ...

- wichtigste physikalische Leistung ist das berühmte Torsionswaage-Experiment (torsion-bar experiment) von 1798, mit dem er die Dichte der Erde sowie indirekt die **Gravitationskonstante** bestimmte.
- Dabei verwendete er eine Torsionswaage mit zwei Bleikugeln, deren minimale Anziehung er mit erstaunlicher Genauigkeit messen konnte. Dieser Versuch war der **erste direkte Nachweis der Kraft zwischen Massen im Labor** und begründete die präzise quantitative Gravitationsforschung.
- In der **Elektrizitätslehre** führte Cavendish systematische Experimente zu **Leitfähigkeit, Kapazität** und **elektrischer Ladung** durch, lange bevor die mathematische Theorie entwickelt wurde.
- Er formulierte, teilweise in unveröffentlichten Manuskripten, Prinzipien, die später als **Ohmsches Gesetz** und **Coulombsches Gesetz** bekannt wurden, und bestimmte die Kapazität von Leitern in einer Genauigkeit, die erst im 20. Jahrhundert übertroffen wurde. Seine Methode, die elektrische Ladung anhand des subjektiven Schmerzniveaus bei elektrischen Schlägen zu quantifizieren, ist aus heutiger Sicht kurios, zeigt aber seine Gründlichkeit.
- Auch in der **Chemie** leistete Cavendish Pionierarbeit, etwa durch die Entdeckung des Wasserstoffs und der Zusammensetzung der Atmosphäre. Obwohl er im Verborgenen arbeitete, gilt Cavendish heute als einer der **bedeutendsten Experimentalphysiker des 18. Jahrhunderts**.

Cavendish bestimmte die Masse der Erde und damit indirekt die Gravitationskonstante G .

Optik

Kurze Geschichte der klassischen Optik

Die Geschichte der **klassischen Optik** ist ein eindrucksvolles Beispiel dafür, wie sich wissenschaftliche Erkenntnisse über Jahrtausende hinweg entwickeln, korrigieren und schliesslich systematisch verbinden lassen. Sie beginnt mit den ersten philosophischen Spekulationen der Antike, führt über die mathematische Präzision der hellenistischen Wissenschaft, erlebt eine tiefgreifende Umgestaltung im arabisch-islamischen Mittelalter und erreicht schliesslich ihre moderne Form durch die quantitativen und experimentellen Erfolge der europäischen Wissenschaft vom 17. bis zum 19. Jahrhundert.

1. Optik in der Antike: Von der Philosophie zur Geometrie

Die ersten systematischen Ansätze zur Optik gehen auf die **vorsokratischen Denker** zurück.

- Bereits **Empedokles** und die **Pythagoreer** beschäftigten sich mit der Frage, wie Sehen überhaupt möglich sei. Die meisten frühen Vorstellungen beruhten auf **Emissionsmodellen**: Man nahm an, das Auge sende Strahlen aus, die beim Zusammentreffen mit Objekten Wahrnehmung ermöglichen. Diese Idee war intuitiv und blieb lange einflussreich.
- Mit **Demokrit** und den **Atomisten** tauchte erstmals ein Gegenentwurf auf: Sie argumentierten, dass von den Dingen selbst „Abbilder“ oder Partikel ausgehen, die ins Auge gelangen. Damit legten sie eine frühe Form der Korpuskularhypothese vor, ohne diese jedoch mathematisch zu formulieren.
- Die erste wirkliche wissenschaftliche Optik entstand jedoch im 3. Jahrhundert v. Chr. mit **Euklid**. In seinem Werk **Optika** begründete er die **geometrische Optik**. Obwohl er selbst die Emissionstheorie vertrat, führte er grundlegende Prinzipien ein: Strahlen verlaufen geradlinig; die Sichtbarkeit hängt vom Strahlenverlauf ab; Grössen erscheinen abhängig vom Sehwinkel. Zum ersten Mal wurde Optik zu einer mathematischen Disziplin, nicht mehr nur zu einer philosophischen Spekulation.
- Die Arbeit wurde im 2. Jahrhundert n. Chr. von **Ptolemäus** erweitert, der umfangreiche Messungen zur **Brechung** durchführte. Er kam zwar nicht auf das heutige Snellius-Gesetz, legte aber Tabellen an, die systematische Abweichungen dokumentierten. Damit entstand die Grundlage für experimentelle Optik.

2. Optik im arabisch-islamischen Mittelalter: Die Geburt der modernen Optik

Einen tiefgreifenden Wandel erfuhr die Optik im 10. und 11. Jahrhundert durch den arabischen Gelehrten Ibn al-Haytham (**Alhazen**).

- Er verwarf endgültig die antike Emissionstheorie und führte die heute gültige Ansicht ein: **Sehen entsteht, weil Licht von den Objekten ins Auge gelangt**. Diese scheinbar einfache Umkehrung war revolutionär, weil sie eine konsequente experimentelle Methodik erforderte.
- In seinem monumentalen Werk Kitāb al-Manāẓir (**Buch der Optik**) entwickelte Alhazen ...
 - eine systematische Lichttheorie,
 - die Beschreibung geradliniger Ausbreitung,
 - ein frühes Verständnis reflektierter und gebrochener Strahlen,
 - die erste wissenschaftliche Erklärung des Sehens und
 - eine experimentelle Methodik, die moderne Standards vorwegnahm.
- Seine Untersuchungen zur **Camera obscura** waren bahnbrechend,
- ebenso seine Erkenntnis, dass das **Gehirn** — nicht das Auge — **Bilder interpretiert**.

Sein Werk wurde später ins Lateinische übersetzt und prägte die Optik Europas über Jahrhunderte.

3. Renaissance und frühe Neuzeit: Vom Lichtstrahl zur brechenden Linse

Im 13.–15. Jahrhundert gewannen die optischen Schriften Alhazens in Europa an Einfluss. Wichtige Weiterentwicklungen kamen von Roger Bacon, Witelo und Johannes Peckham, die Alhazens Theorien verbreiteten und kommentierten.

Parallel entwickelte sich die **Linsentechnik**: Brillen wurden ab dem späten 13. Jahrhundert in Italien verwendet, und diese technische Entwicklung bereitete den Boden für die nächste grosse Revolution — die Erfindung des Fernrohrs.

Diese Erfindung ermöglichte **Galileo Galilei ab 1609** revolutionäre astronomische Beobachtungen.

Noch wichtiger für die Optik war jedoch seine Einsicht, dass physikalische Untersuchungen auf systematische Experimente und mathematische Gesetze gestützt sein müssen. Damit verschob sich der Schwerpunkt von philosophischer Spekulation zur quantitativen Naturwissenschaft.

Zeitgleich formulierte **Johannes Kepler** (1604, 1611) die **Grundlagen der modernen Strahlenoptik**, einschliesslich der Bilderzeugung durch Linsen und des umgekehrten Bildes auf der Netzhaut. Seine Arbeiten gelten als Ausgangspunkt der physikalischen Optik des 17. Jahrhunderts.

4. Die wissenschaftliche Optik der Klassik: Wellen vs. Teilchen

Im 17. Jahrhundert entfachte sich der grosse Konflikt, der die Geschichte der Optik über 200 Jahre bestimmte: **Ist Licht ein Strom von Teilchen oder eine Welle?**

Newton: Das Zeitalter der Korpuskularoptik

- Isaac Newton formulierte um **1672** seine Theorie, nach der **Licht aus Partikeln besteht**, die in geraden Linien fliegen und durch Kräfte an Grenzflächen abgelenkt werden.
- Seine Theorie erklärte Reflexion und Brechung qualitativ und war mit dem linearen Strahlenbild gut vereinbar.
- Newtons Autorität war so gross, dass seine Theorie fast 100 Jahre dominierte.
- Wesentlich waren seine Entdeckungen zur **Dispersion** und zur Zusammensetzung des weissen Lichts, die für die Farbenlehre grundlegend sind.

Huygens: Die Wellentheorie entsteht

- Gegen Newtons Ansicht entwickelte Christiaan Huygens **1690** eine elegante und in vielen Bereichen zutreffende **Wellenoptik**.
- Sein Prinzip — jede Wellenfront ist die Überlagerung sekundärer Wellen — erklärte Brechung, Reflexion und Doppelbrechung tiefgreifender und mathematisch präziser als das Korpuskularmodell.
- Allerdings fehlte ihm ein entscheidendes Phänomen als Beweis: Interferenz.

5. Die Optik im 19. Jahrhundert: Der endgültige Sieg der Wellen

Den entscheidenden Schritt zur modernen Optik leisteten im frühen 19. Jahrhundert Thomas Young und Augustin Fresnel.

Thomas Young

- Mit seinem berühmten **Doppelspalt-Experiment** (1801) wies Young Interferenz nach — der eindeutige Beweis für die Wellennatur.
- Seine Arbeiten zur Kreiswellentheorie, Beugung und Farbwahrnehmung schufen einen neuen Rahmen für die physikalische Optik.

Augustin Fresnel

- Fresnel kombinierte Youngs Ideen mit **strenger Mathematik**.
- Seine Theorie der **Beugung** und **Polarisation** war so erfolgreich, dass Newtons Teilchenmodell endgültig verdrängt wurde.
- Fresnel entwickelte zudem die Theorie der **Transversalwellen**, womit er das **polarisierte Licht** physikalisch erklären konnte.
- Damit stand erstmals eine vollständige, experimentell bestätigte und mathematisch konsistente Wellentheorie des Lichts zur Verfügung.

6. Maxwell und die Vereinigung von Licht und Elektromagnetismus

Die bedeutendste Entwicklung der klassischen Optik erfolgte im 19. Jahrhundert durch **James Clerk Maxwell**.

- Mit seinen Gleichungen zeigte er 1864, dass **Licht eine elektromagnetische Welle ist** — ein Triumph der theoretischen Physik.
- Damit wurde Optik zu einem Teilgebiet der Elektrodynamik.
- Diese Erkenntnis veränderte die Optik grundlegend:
 - Lichtgeschwindigkeit ergibt sich aus elektrischen und magnetischen Konstanten.
 - Es existiert ein ganzes Spektrum elektromagnetischer Wellen.
 - Licht ist eine physikalische Störung des elektromagnetischen Feldes.
 - Der Schritt von der klassischen Optik zur modernen Physik war damit vollzogen.

7. Das Ende der klassischen Optik: Experimente, die zum Umdenken zwangen

Obwohl die klassische Optik äusserst erfolgreich war, stiessen mehrere Experimente an Grenzen. Beispielsweise ...

- Michelson-Morley-Experiment (1887):
Kein Nachweis eines Lichtäthers. Dies widerlegte die Vorstellung eines festen Mediums für Lichtwellen.
- Schwarzkörperstrahlung (1899–1900):
Klassische Optik und Elektrodynamik scheiterten an einer konsistenten Erklärung.
- Photoeffekt (1905):
Ein Hinweis auf die **Teilchenhaftigkeit** des Lichts.

Damit endete die klassische Optik und führte direkt in die **moderne Optik**: Quantentheorie und Relativität.

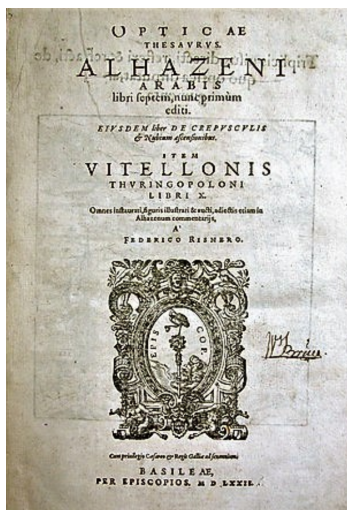
8. Fazit

Die klassische Optik ...

- entstand aus spekulativen antiken Ideen,
- reifte durch mathematische und experimentelle Präzision im Mittelalter und der Neuzeit und
- wurde schliesslich im 19. Jahrhundert durch die elektromagnetische Theorie vereinheitlicht.

Die klassische Optik ist ein Lehrbuchbeispiel für die Entwicklung wissenschaftlicher Erkenntnis: ein Wechselspiel aus Beobachtung, Theorie, technologischem Fortschritt und manchmal auch jahrhundertelangen Irrtümern.

Alhazen (Ibn al-Haytham, 965–1040)



Alhazens "Schatz der Optik" - Titelseite der lateinischen Übersetzung (1572)

Alhazen (Ibn al-Haytham, 965–1040, Link), geboren in Basra und später in Kairo tätig, gilt als einer der bedeutendsten Naturforscher des Mittelalters und als „**Vater der Optik**“. Sein Lebensweg führte ihn vom Verwaltungsdienst über eine kurze Phase politischer Ungnade bis zu jahrzehntelanger wissenschaftlicher Arbeit unter Hausarrest – eine Zeit, in der er seine wichtigsten Werke verfasste.

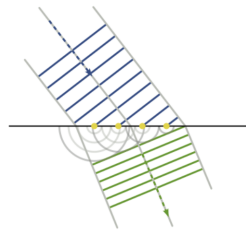
- Sein Hauptwerk, das Kitab al-Manazir (**Buch der Optik**, 1021), markiert einen Wendepunkt in der Geschichte der Physik, da er dort die **experimentelle Methode** erstmals systematisch formulierte.
- Alhazen **widerlegte die griechische Sehtheorie**, nach der das Auge Strahlen aussendet. Stattdessen postulierte er korrekt, dass Licht von Objekten reflektiert wird und ins Auge gelangt.
- Er analysierte **Brechung, Spiegelbilder, Linsenwirkungen** und **Kameraobscura**-Phänomene und entwickelte ein geometrisches Modell der Sichtlinien.
- Seine Arbeiten enthalten frühe Ansätze zu **Trägheit, Impulsübertragung** und physikalischer **Kausalanalyse**.
- Entscheidend war sein **methodischer Anspruch**: Beobachtung, Hypothesenbildung und überprüfende Experimente. Damit legte er Grundlagen, auf denen später europäische Optiker wie Kepler, Descartes und Newton unmittelbar aufbauten.

Augen senden keine Strahlen aus.

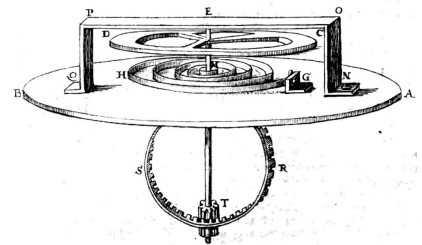
Christiaan Huygens (1629–1695)



Huygens



Huygens-Konstruktion



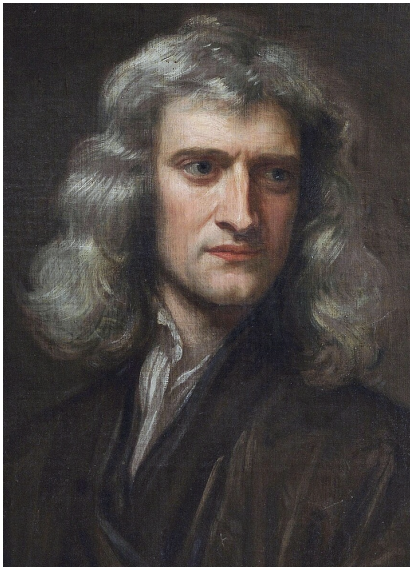
Uhr mit Spiralfeder

Christiaan Huygens (1629–1695, Link), Sohn eines angesehenen Diplomaten in Den Haag, war einer der vielseitigsten Gelehrten des 17. Jahrhunderts.

- In der Physik wurde er vor allem durch seine **Wellentheorie des Lichts** berühmt, die er 1678 formulierte: Licht breitet sich nach dem **Huygens'schen Prinzip** wellenförmig aus, wobei jede Punktquelle einer Wellenfront selbst als Ausgangspunkt neuer Elementarwellen dienen kann.
- Er entwickelte präzise **Pendeluhr**. Seine Pendeluhr war die erste wissenschaftlich präzise Zeitmessung und ermöglichte exakte Experimente.
- Er verbesserte **Linsenschleiftechniken**, was ihn zu astronomischen Entdeckungen wie dem Titan, Saturns grösstem Mond, führte.
- Das Huygens'sche Prinzip erklärte **Reflexion**, **Brechung** und **Doppelbrechung** in Kristallen.
- Huygens entwickelte zudem die moderne **Stosstheorie** und definierte früh den Begriff der **Zentrifugalkraft**.
- Mit mathematischer und experimenteller Strenge wurde Huygens zu einem zentralen Wegbereiter der klassischen Mechanik und der späteren Wellenoptik.

Licht breitet sich als Welle aus.

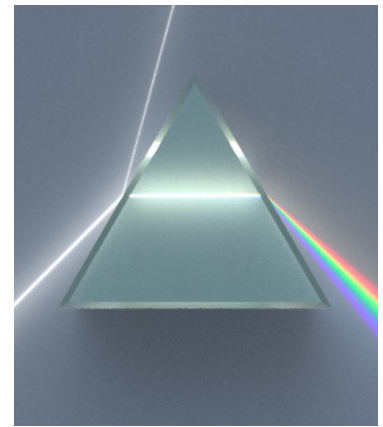
Isaac Newton (1642–1727)



Newton



Spiegelteleskopmodell (1672)



Prisma

Isaac Newton (1642–1727, Link) gehört zu den einflussreichsten Wissenschaftlern der Menschheitsgeschichte. Während seines Studiums an der Universität Cambridge und in einer intensiven Schaffensperiode während der Pestjahre 1665–1666 entwickelte Newton grundlegende Konzepte, die später zur Formulierung seiner bahnbrechenden Theorien führten.

Newtons bedeutendste Leistungen liegen in der klassischen Mechanik, der Gravitationstheorie, der Optik und der Mathematik.

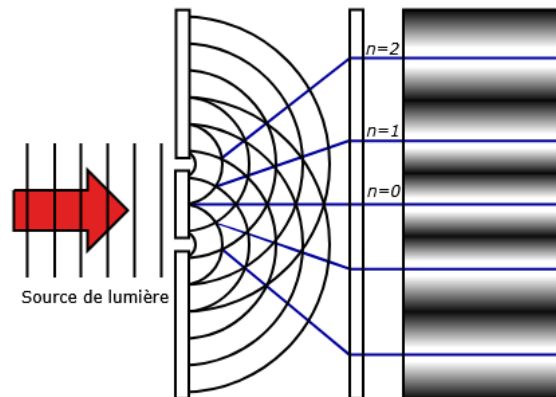
- Sein Hauptwerk **Philosophiae Naturalis Principia Mathematica** (1687) formuliert die **Bewegungsgesetze** und das **Gravitationsgesetz**, die erstmals alle Bewegungen im Kosmos einheitlich erklären.
- Newton zeigte, dass Keplers Planetenbahnen aus der Gravitation folgen und erklärte sowohl Gezeiten als auch Pendelbewegungen und die Präzession der Mondbahn. Damit schuf er einen physikalischen Rahmen, der bis in die Moderne gültig blieb.
- Newton zeigte, dass irdische und himmlische Mechanik denselben Gesetzen folgen – ein revolutionärer Schritt in der Physikgeschichte.
- Ebenso bahnbrechend waren seine optischen Forschungen: Er entdeckte, dass **weisses Licht aus Spektralfarben** (Spektroskopie) besteht, erklärte **Dispersion im Prisma** und entwickelte das **Reflexionsfernrohr**, das chromatische Aberration vermeidet.
- Newton vertrat die Ansicht, dass **Licht aus Korpuskeln** besteht. Die Welleneigenschaften konnte er allerdings nicht erklären. Das heutige Photon (gemäß dem Welle/Teilchen Dualismus) hat mit den Korpuskeln von Newton nichts zu tun.
- In der Mathematik begründete Newton (parallel zu Leibniz) die **Infinitesimalrechnung**, formulierte die Binomialreihe und entwickelte Methoden, die heute Grundwerkzeuge der Physik sind.
- **Newtons physikalische Weltsicht prägte über zwei Jahrhunderte die gesamte Wissenschaft**; seine Synthese aus Experiment, Mathematik und universellen Gesetzmässigkeiten gilt als Geburtsstunde der modernen Physik.

Weisses Licht ist aus Farben zusammengesetzt.

Thomas Young (1773–1829)



Thomas Young



Doppelspalt und Interferenzmuster (Link)

Thomas Young (1773–1829, Link) war ein Universalgelehrter, ausgebildeter Arzt und Sprachforscher, doch seine nachhaltigste Wirkung entfaltet sich in der Physik.

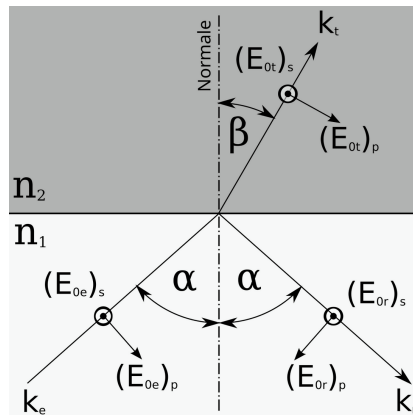
- Sein berühmt gewordenes **Doppelspaltexperiment** von 1801 lieferte den klaren experimentellen Beweis für die **Wellennatur des Lichts**. Die Interferenzstreifen, die bei Überlagerung zweier kohärenter Lichtquellen entstehen, widerlegten die zuvor dominierende Newtonsche Korpuskulartheorie.
- In der Optik erklärte er die **Farbenwahrnehmung** durch ein **Dreirezeptorenmodell** – der Vorläufer der heutigen Farbtheorie.
- Young führte den Begriff der **Elastizitätskonstante** (Young-Modul) ein, klärte die Mechanik von **Oberflächenwellen** und formulierte frühe Ideen zur **Energieerhaltung**.
- Er war ein Wissenschaftler, der Prinzipien aus Medizin, Mechanik, Optik und Sprachwissenschaft zu neuen Einsichten verband und zeigt, wie interdisziplinäres Denken fundamentale physikalische Erkenntnisse hervorbringen kann.

Youngs Doppelspalt-Experiment (1801) - Licht verhält sich wie eine Welle.

Augustin-Jean Fresnel (1788–1827)



Fresnel



e.m. Wellen an einem Übergang

Augustin-Jean Fresnel (1788–1827, Link) war ursprünglich Ingenieur und arbeitete an Strassen- und Hafenanlagen, bevor er sich ganz der Optik zuwandte.

- Seine Arbeiten legten endgültig die Grundlage der modernen Wellenoptik, indem er die mathematische **Interferenztheorie** des Lichts formulierte.
- Er entwickelte das **Prinzip der kohärenten Superposition** und leitete die berühmten **Fresnelschen Integrale und Zonenplatten** her, mit denen sich Diffraction präzise berechnen liess.
- Fresnel erklärte **Polarisationsphänomene** durch Transversalwellen, ein entscheidender Fortschritt gegenüber allen früheren Lichtmodellen.
- Sein theoretisches und experimentelles Werk verdrängte endgültig die korpuskulare Lichttheorie.
- Neben seinen theoretischen Leistungen erfand Fresnel die Stufenlinse (**Fresnel-Linse**) für Leuchttürme, die bis heute weltweit im Einsatz ist und Licht effizient bündelt.
- Fresnels Synthese aus Mathematik, Experiment und Ingenieurskunst machte ihn zu einem der wichtigsten Optiker der Wissenschaftsgeschichte.

Das Licht ist eine Transversalwelle.

Wärmelehre

Kurze Geschichte der klassischen Wärmelehre

1. Einleitung: Von der Sinneserfahrung zur Naturwissenschaft

Die Wärmelehre hat ihren Ursprung in einer alltäglichen Erfahrung: Körper fühlen sich warm oder kalt an, verändern ihren Zustand oder übertragen Wärme aufeinander. Doch der Weg von dieser elementaren Wahrnehmung zu einer exakten naturwissenschaftlichen Theorie war überraschend lang und von zahlreichen Irrtümern geprägt. Erst zwischen dem 17. und dem 19. Jahrhundert entwickelte sich aus philosophischen Spekulationen eine autonome physikalische Disziplin: die klassische Thermodynamik. Sie sollte nicht nur das Verständnis von Wärme und Temperatur revolutionieren, sondern letztlich auch die industrielle Welt und die technische Zivilisation des 19. und 20. Jahrhunderts prägen.

2. Erste Vorstellungen: Antike und Mittelalter

In der Antike dominierte die Vier-Elemente-Lehre des Empedokles und Aristoteles. **Wärme galt nicht als physikalische Grösse, sondern als Qualität der „Elemente“ Feuer und Luft.** Aristoteles beschrieb Erwärmung als Mischung oder Trennung dieser Urstoffe; ein experimentelles Vorgehen existierte kaum. Im Mittelalter führten arabische Naturforscher, darunter Alhazen und Avicenna, systematische Beobachtungen durch, doch erst die europäische Renaissance brachte gezielte Messmethoden hervor. Frühthermometer aus Luftvolumenänderungen entstanden im 16. Jahrhundert, die temperaturabhängig reagierten, aber noch keine einheitliche Skala besaßen. Die Grundlagen einer quantifizierbaren Wärmelehre fehlten weiterhin.

3. Die Geburt der modernen Wärmelehre: 17. Jahrhundert

Im 17. Jahrhundert begannen Naturforscher wie Galileo Galilei, Robert Boyle und Robert Hooke experimentell zu arbeiten und mathematische Beziehungen zu formulieren – ein entscheidender Schritt.

- Galilei konstruierte das **Thermoskop** und erkannte, dass Temperatur eine messbare Grösse ist.
- Boyle verband Druck und Volumen eines Gases mathematisch (**Boyle-Mariotte-Gesetz**) und zeigte, dass die Eigenschaften von Gasen mechanisch erklärbar sind.

Diese Entwicklungen führten zu **zwei konkurrierenden Wärmeverstellungen**:

- Die mechanische Theorie, die **Wärme als Bewegung kleinster Teilchen** interpretierte.
- Die später dominante Caloric-Theorie, die **Wärme als eine Art unsichtbare, nicht komprimierbare Flüssigkeit** betrachtete – das sogenannte **Caloricum**.

4. Die Caloric-Theorie im 18. Jahrhundert

Die **Caloric-Theorie** bot eine scheinbar überzeugende Grundlage: Sie erklärte Wärmeströmung, Temperaturerhöhung und Wärmekapazitäten in Analogie zu hydraulischen Prozessen.

Joseph Black (1728-1799) führte präzise Experimente ein und entwickelte Begriffe wie **spezifische Wärme und latente Wärme**, die unabhängig von der theoretischen Deutung äusserst nützlich blieben. Seine Arbeiten machten Wärme zu einer quantitativ fassbaren Messgrösse.

In dieser Phase entstanden erste Energieüberlegungen, allerdings noch ohne klaren Energiebegriff. Man nahm an, dass bei chemischen Reaktionen oder Reibung Caloricum freigesetzt oder gebunden werde. Viele Phänomene liessen sich tatsächlich „scheinbar“ plausibel erklären, weshalb die Theorie bis weit ins 19. Jahrhundert attraktiv blieb.

5. Revolution durch Experimente: 18.–19. Jahrhundert

5.1 Rumford und die mechanische Erzeugung von Wärme

Benjamin Thompson, Graf von Rumford, beobachtete bei der Herstellung von Kanonenrohren, dass endlose Mengen an Wärme durch Reibung erzeugt werden konnten. Dies widersprach fundamental einer Flüssigkeitstheorie: Eine Substanz kann nicht unbegrenzt erzeugt werden.

Rumford folgerte, dass **Wärme mit Bewegung von Materie verbunden sein müsse** – ein entscheidender Schritt hin zur kinetischen Theorie.

5.2 Joules Messung der mechanischen Äquivalenz von Wärme

Der Durchbruch kam mit James Prescott **Joule** in den 1840er Jahren. Joule gelingt die quantitative Messung des Zusammenhangs zwischen mechanischer Arbeit und Wärme, später bekannt als das mechanische **Wärmeäquivalent**. Seine berühmten Paddelradexperimente zeigten:

Mechanische Arbeit lässt sich vollständig in Wärme verwandeln.

Damit wurde die Energieerhaltung erstmals für mechanische und thermische Prozesse zusammengeführt. Die Wärmelehre wurde zur Thermodynamik.

6. Die Formulierung der Hauptsätze der Thermodynamik

Mit der Einführung des Energiebegriffs entwickelten mehrere Wissenschaftler nahezu gleichzeitig die Grundgesetze der Thermodynamik.

6.1 Sadi Carnot und der ideale Kreisprozess

Sadi Carnot analysierte die Dampfmaschine – die Schlüsseltechnologie seiner Zeit – und beschrieb den idealen Wirkungsgrad eines Kreisprozesses. Obwohl er noch im Rahmen der Caloric-Theorie arbeitete, legte er die Grundlage für ...

- den **Carnot-Prozess**,
- das Konzept der reversiblen Prozesse und
- die spätere Entropiedefinition.

Seine Arbeit zeigt erstmals, dass der Wirkungsgrad prinzipiell begrenzt ist – unabhängig von der Konstruktion und vom verwendeten Fluid.

6.2 Clausius und der zweite Hauptsatz

Rudolf Clausius formulierte das Energieprinzip konsequent um und löste den Carnot-Ansatz aus der veralteten Caloric-Theorie. In seiner Arbeit entsteht ...

- der **erste Hauptsatz**: Energie kann weder geschaffen noch vernichtet werden.
- der **zweite Hauptsatz**: Wärme fließt spontan nur vom Warmen zum Kalten.

Clausius definiert zudem Entropie als eine physikalische Grösse, die die Irreversibilität quantifiziert.

6.3 Lord Kelvin und absolute Temperatur

William Thomson (**Lord Kelvin**) schuf die **absolute Temperaturskala** und verdeutlichte, dass thermische Prozesse eine fundamentale Richtung haben – das Konzept des **thermischen Gleichgewichts**.

7. Die kinetische Gastheorie: Von Clausius zu Maxwell und Boltzmann

7.1 Molekulare Bewegung als Wärmeursache

Die mechanische Wärmetheorie führte zur Frage: Wie bewegen sich Moleküle?

James Clerk Maxwell entwickelte ab 1859 die erste statistische Beschreibung der Geschwindigkeitsverteilung von Teilchen – die berühmte **Maxwell-Verteilung**.

Ludwig Boltzmann erweiterte diese Ideen zu einer umfassenden statistischen Theorie. Seine Leistungen ...

- die Boltzmannschen Transportgleichungen,
- die statistische Interpretation der Entropie und
- das berühmte H-Theorem.

Damit wurde Wärme endgültig zur Form mikroskopischer Bewegung, und Entropie erhielt eine molekulare Deutung.

7.2 Widerstände und endgültiger Durchbruch

Viele Zeitgenossen lehnten atomare Modelle ab (u.a. Ernst Mach und Wilhelm Ostwald). Erst Experimente wie **Brownsche Bewegung** (Einstein 1905, Perrin 1908) bestätigten die Existenz von Atomen und die Gültigkeit der kinetischen Theorie.

8. Abschluss des klassischen Zeitalters

Um 1900 war die klassische Wärmelehre weitgehend abgeschlossen ...

- Die Hauptsätze der Thermodynamik waren formuliert.
- Atome waren als physikalische Realität anerkannt.
- Wärme war als Energieform verstanden.
- Statistische Mechanik verband Mikroskopisches und Makroskopisches.

Erst mit der Quantentheorie (Planck 1900) und Quantenstatistik (Bose-Einstein, Fermi-Dirac) wurde die klassische Theorie erweitert. Doch ihre Grundprinzipien blieben erhalten und bilden bis heute das Fundament vieler Bereiche – von der Ingenieurtechnik bis zur modernen Physik.

9. Schlussbemerkung

Die Geschichte der klassischen Wärmelehre zeigt exemplarisch, wie Wissenschaft funktioniert: durch das Zusammenspiel von Beobachtung, experimenteller Präzision, mathematischer Formulierung und theoretischer Neuinterpretation. Von den frühesten Vorstellungen der Antike bis zu den exakten Hauptsätzen der Thermodynamik war es ein Weg voller Irrtümer, Debatten und überraschender Wendungen. Das Ergebnis ist jedoch ein in sich geschlossenes Theoriegebäude, das zu den erfolgreichsten und universellsten in der gesamten Naturwissenschaft zählt.

Robert Boyle (1627–1691)



Robert Boyle



Boyles (Hooke's) Pneumatic engine

Robert Boyle (1627–1691, Link) war ein irisch-englischer Naturforscher und einer der bedeutendsten Vertreter der frühen experimentellen Naturwissenschaft. Als Mitglied der “Royal Society” beeinflusste er die Entstehung der wissenschaftlichen Methode entscheidend. Boyle gilt als Begründer der modernen Chemie, doch seine Arbeiten hatten ebenso grossen Einfluss auf die Physik, insbesondere auf die Erforschung von Gasen.

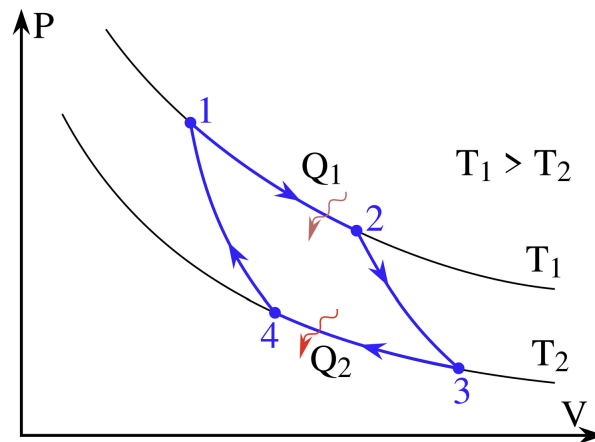
- Sein wichtigster Beitrag ist das heute als **Boyle-Mariotte-Gesetz** (1662), das den Zusammenhang zwischen Druck und Volumen eines Gases beschreibt: Bei konstanter Temperatur ist ihr Produkt pV konstant.
- Boyles Arbeiten legten das **Fundament der Gasgesetze** und beeinflussten später Dalton, Kelvin, Maxwell und die thermodynamische Theorie.
- Dieser Zusammenhang war revolutionär, weil er zeigte, **dass sich physikalische Systeme quantitativ beschreiben und vorhersagen lassen.**
- Boyle entwickelte ausserdem eine verbesserte **Luftpumpe**, mit der er Experimente zum Luftdruck, zur Schallausbreitung und zu Vakuumphänomenen durchführte.
- Er widersprach der alten aristotelischen Auffassung der vier Elemente und formulierte eine frühe **Teilchen- bzw. Korpuskeltheorie**, die heutige atomistische Konzepte vorwegnahm.
- Seine experimentelle Vorgehensweise, sorgfältige Dokumentation und Skepsis gegenüber spekulativer Naturphilosophie machten ihn zu einem Wegbereiter der modernen empirischen Physik.

$pV = \text{konst}$ bei konstanter Temperatur.

Sadi Carnot (1796–1832)



Sadi Carnot



Carnot Zyklus

Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796–1832, Link) war ein französischer Ingenieur und gilt als „**Vater der Thermodynamik**“. Obwohl er nur 36 Jahre alt wurde und zu Lebzeiten kaum Beachtung fand, markiert seine **Schrift „Réflexions sur la puissance motrice du feu“ (1824) einen Wendepunkt in der Physik.**

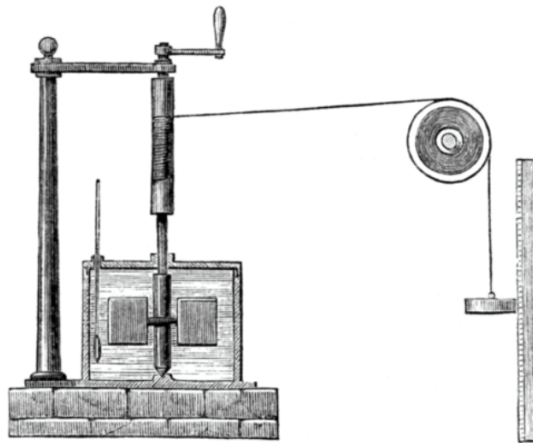
- Carnot analysierte, wie Wärmekraftmaschinen und Dampfmaschinen arbeiten, und erkannte, dass ihr Wirkungsgrad unabhängig von der konkreten Konstruktion grundsätzlich begrenzt ist.
- Er entwarf den idealisierten **Carnot-Kreisprozess**, der beschreibt, wie maximaler Wirkungsgrad erreicht werden kann, wenn eine Maschine zwischen einer wärmeren und einer kälteren Temperatur operiert.
- Diese Einsicht führte später zur Formulierung des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik: Wärme kann nicht vollständig in Arbeit umgewandelt werden, da stets ein Teil unvermeidlich in eine kältere Umgebung abfließt.
- Carnots Arbeit schuf damit die **theoretische Grundlage für Entropie, Temperaturdifferenzen als treibende Kraft** und die **Unumkehrbarkeit natürlicher Prozesse**.
- Ohne seine Ideen wären die Entwicklungen von Clausius, Kelvin, Boltzmann oder Planck kaum denkbar gewesen. Zwar ahnte Carnot noch nicht, dass Wärme eine Form von Energie ist, doch seine strukturellen Einsichten waren derart präzise, dass sie die Thermodynamik auf eine neue wissenschaftliche Basis stellten und bis heute zentrale Bedeutung besitzen.

Der Wirkungsgrad bei der Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Arbeit ist begrenzt.

James Prescott Joule (1818–1889)



James Prescott Joule



Versuchsaufbau zum Wärmeäquivalent (1869)

James Prescott Joule (1818–1889, Link) war ein englischer Physiker und Brauer, dessen genaue experimentelle Arbeitsweise die Grundlagen der modernen Thermodynamik prägte. Ohne formale Universitätsausbildung bildete er sich weitgehend autodidaktisch weiter und führte Experimente mit bemerkenswerter Präzision durch. Sein wohl bedeutendster Beitrag war der Nachweis der mechanischen Äquivalenz von Wärme. In einer Serie von Messungen—darunter das berühmte Joule'sche Rührer-Experiment, bei dem mechanische Arbeit Wasser erwärmt—zeigte er, dass Wärme keine eigenständige Substanz ist, sondern eine Form von Energie.

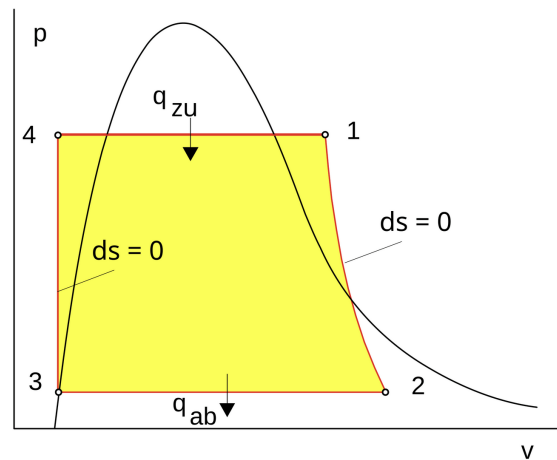
- Joule bestimmte erstmals (1845) das **mechanische Wärmeäquivalent** (später Joule-Konstante genannt) mit beeindruckender Genauigkeit. Wärme ist keine Substanz ("Kalorikum"), sondern eine Energieform.
- Damit lieferte er die **empirische Grundlage für den Ersten Hauptsatz der Thermodynamik**: Energie kann weder geschaffen noch zerstört, sondern nur umgewandelt werden.
- Gemeinsam mit Lord Kelvin entwickelte er das Konzept der **absoluten Temperaturskala** und erforschte die thermodynamischen Eigenschaften von Gasen, etwa durch den **Joule-Thomson-Effekt**, der heute bei der Verflüssigung von Gasen eine wichtige Rolle spielt.
- Seine Arbeiten verknüpften Mechanik, Wärmelehre und Elektromagnetismus auf neue Weise und machten Energie zu einer vereinheitlichenden Grundgröße der Physik.
- Joules Forschung begründete das Energieprinzip als fundamentales Naturgesetz und bereitete damit den Übergang zur modernen Physik vor.

Die mechanische Arbeit und die Wärme sind unterschiedliche Formen der gleichen physikalischen Grundgröße Energie.

Rudolph Clausius (1822–1888)



Rudolph Clausius



Clausius-Rankine-Prozess

Rudolph Clausius (1822–1888, Link) war ein deutscher Physiker. Er studierte Physik und Mathematik an der Universität Berlin und verbrachte den grössten Teil seiner wissenschaftlichen Laufbahn als Professor in Bonn. Clausius gilt als einer der Begründer der klassischen Thermodynamik. Seine wichtigsten Leistungen ...

- Clausius trug wesentlich zur Klärung des **ersten Hauptsatzes der Thermodynamik** bei, indem er den Zusammenhang zwischen Wärme, Arbeit und innerer Energie präziserte.
- Auch in der **kinetischen Gastheorie** leistete er wichtige Beiträge, indem er das mikroskopische Teilchenbild mit den makroskopischen Gesetzen der Wärmelehre verband.
- Clausius' Arbeiten schufen die theoretische Grundlage für ein tiefes Verständnis von Energieumwandlungen und beeinflussten nachhaltig die Entwicklung der statistischen Physik und der technischen Thermodynamik.
- In einer Reihe grundlegender Arbeiten formulierte er den **zweiten Hauptsatz der Thermodynamik** in präziser Form und zeigte, dass Wärme nicht von selbst von einem kälteren auf einen wärmeren Körper übergehen kann. Um die Richtung thermischer Prozesse mathematisch zu erfassen, führte Clausius im Jahr 1865 den Begriff der **Entropie** ein, eine der zentralen Grössen der Physik. Mit diesem Konzept wurde erstmals verständlich, warum viele Prozesse in der Natur irreversibel sind.

Wärme kann nicht von selbst von einem kälteren auf einen wärmeren Körper übergehen.

Ludwig Boltzmann (1844–1906)



Ludwig Boltzmann

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla_{\vec{x}} + \frac{\vec{F}}{m} \cdot \nabla_{\vec{v}} \right) f(\vec{x}, \vec{v}, t) = \left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{\text{Stoss}}$$

Boltzmann-Gleichung

Ludwig Boltzmann (1844–1906, Link) war ein österreichischer Physiker und einer der wichtigsten Begründer der Statistischen Mechanik.

- Sein Lebenswerk bestand darin, zwischen der **mikroskopischen** Welt der Atome und den **makroskopischen** Gesetzmässigkeiten der Thermodynamik eine Brücke zu schlagen.
- Obwohl die Existenz von Atomen zu seiner Zeit heftig umstritten war, entwickelte Boltzmann kühne mathematische Modelle, die zeigen sollten, dass **makroskopische Grössen wie Druck, Temperatur oder Entropie aus dem Verhalten zahlloser Teilchen resultieren**.
- Berühmt ist die **Boltzmann-Gleichung**, die beschreibt, wie sich Teilchenverteilungen in Gasen zeitlich ändern. Sie macht erstmals die Dynamik eines Gases statistisch berechenbar.
- Ebenso grundlegend ist seine Formel **$S = k \cdot \ln W$** , die den Zusammenhang zwischen **Entropie** und der Anzahl mikroskopischer Zustände herstellt. Diese Beziehung bildet das Fundament der Informationstheorie und der modernen Physik.
- Boltzmanns Arbeit erklärte die Mikroursachen des Zweiten Hauptsatzes: **Entropie wächst, weil Zustände höherer Wahrscheinlichkeit statistisch bevorzugt sind**.
- Seine Ideen ermöglichten den späteren Aufstieg der Quantenmechanik und der modernen statistischen Physik. Trotz wissenschaftlicher Erfolge kämpfte Boltzmann zeitlebens gegen starken philosophischen Widerstand und gesundheitliche Belastungen. Heute gilt er als einer der bedeutendsten theoretischen Physiker aller Zeiten.

Makroskopischen Grössen wie Druck, Temperatur und Entropie ergeben sich aus dem Verhalten zahlloser Teilchen.

Elektrizitätslehre

Kurze Geschichte der klassischen Elektrodynamik

1. Einleitung

Die **klassische Elektrodynamik** zählt zu den bedeutendsten und vollständigsten Theorien der Physik. Sie beschreibt das Zusammenspiel von elektrischen und magnetischen Feldern sowie deren Wirkung auf geladene Teilchen. Ihre Entwicklung erstreckte sich über fast drei Jahrhunderte und führte zu einer der ersten grossen „vereinheitlichten“ Theorien der Naturwissenschaft. Sie bildet bis heute die Grundlage zahlreicher Technologien – von elektrischen Motoren über Funk und Lichttechnik bis hin zu Computern und Energienetzen. Der Weg zu dieser Theorie war jedoch kein gradliniger. Er begann mit ersten Beobachtungen von Elektrizität und Magnetismus in der Antike und kulminierte schliesslich im 19. Jahrhundert in James Clerk Maxwells berühmten Gleichungen.

2. Frühgeschichte: Von antiken Kenntnissen bis zum 17. Jahrhundert

Bereits die Griechen kannten einfache elektrische Erscheinungen. **Thales** von Milet beschrieb im 6. Jahrhundert v. Chr., wie durch Reiben von Bernstein leichte Objekte angezogen wurden – ein Hinweis auf elektrische Aufladung. Ebenso waren der Magnetstein und seine Kräfte bekannt. Doch fehlten theoretische Modelle oder systematische Untersuchungen.

Erst im Mittelalter und der frühen Neuzeit wurden Magnetismus und Elektrizität erneut Gegenstand naturwissenschaftlicher Forschung. Ein entscheidender Schritt gelang William **Gilbert** (1544–1603). In seinem Werk *De Magnete* zeigte er, dass die Erde selbst ein Magnet ist und entwickelte ein erstes kohärentes Verständnis magnetischer Felder. Gilbert gilt deshalb als Begründer der experimentellen Magnetismusforschung.

Dennoch blieb Elektrizität bis ins 17. Jahrhundert hinein eine Kuriosität: Funken, glühende Erscheinungen oder die Tierstrom-Debatte bei Zitterfischen faszinierten, doch existierte noch keine physikalische Systematik.

3. Elektrizität und Magnetismus im 18. Jahrhundert

Das 18. Jahrhundert brachte die entscheidenden Schritte zur Quantifizierung elektrischer Erscheinungen. Experimente mit Reibungselektrizität führten zur Konstruktion früher elektrostatischer Generatoren und Leidener Flaschen, der ersten Kondensatoren.

Wichtige Beiträge leisteten u. a.:

- Charles-Augustin de **Coulomb** (1736–1806) mit dem Coulombschen Gesetz, das die Kraft zwischen Punktladungen beschreibt und dem elektrischen Feldbegriff mathematische Präzision gab.
- Benjamin **Franklin** (1706–1790), der den Begriff „positiv/negativ“ für Ladungen einführte und die Ein-Fluid-Theorie der Elektrizität prägte.
- Luigi **Galvani** (1737–1798) und Alessandro **Volta** (1745–1827): Galvani entdeckte die „tierische Elektrizität“, Volta zeigte, dass es sich um ein elektrochemisches Phänomen handelt und erfand die Voltasche Säule – die erste Batterie.

Diese Entwicklungen markierten den Übergang von elektrostatischen Experimenten hin zu einer kontinuierlichen elektrischen Stromquelle. Trotz grosser Fortschritte blieben Elektrizität und Magnetismus jedoch noch weitgehend unabhängige Forschungsgebiete.

4. Der Beginn der modernen Elektrodynamik: Ørsted, Ampère und Faraday

Der Wendepunkt kam im Jahr 1820, als Hans Christian **Ørsted** zufällig entdeckte, dass ein elektrischer Strom eine Magnetnadel ablenkt. Dieses Experiment zeigte erstmals eindeutig, dass Strom (Elektrizität) magnetische Wirkungen hervorruft.

Nur wenige Monate später entwickelte André-Marie **Ampère** eine mathematische Theorie, die den Zusammenhang zwischen Strom und magnetischen Kräften beschrieb. Die Ampèreschen Gesetze formten den Grundstein der Elektrodynamik.

Michael **Faraday** (1791–1867) schliesslich revolutionierte das Gebiet vollständig. Er entdeckte ...

- die elektromagnetische Induktion (1831),
- die Funktionsweise des Generators,
- das Prinzip des Transformators
- und formte das moderne Konzept des Feldes.

Faradays Feldlinienmodell war zunächst eher qualitativ, doch es inspirierte James Clerk Maxwell zu seiner mathematischen Theorie. Faraday gilt daher als „der experimentelle Vater“ der Elektrodynamik.

5. Maxwells Revolution: Die Vereinigung von Elektrizität, Magnetismus und Licht

James Clerk **Maxwell** (1831–1879) schuf eine der grossen wissenschaftlichen Leistungen der Menschheitsgeschichte. In mehreren Arbeiten zwischen 1861 und 1865 formalisierte er Faradays Feldideen mathematisch und entwickelte die vier Maxwellschen Gleichungen, die bis heute das Fundament der klassischen Elektrodynamik bilden.

Die wesentlichen Ergebnisse ...

- Elektrische und magnetische Felder sind nicht getrennt, sondern zwei Aspekte eines einheitlichen elektromagnetischen Feldes.
- Änderungen elektrischer Felder erzeugen magnetische Felder – und umgekehrt.
- Die Gleichungen sagen die Existenz elektromagnetischer Wellen voraus, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.
- Licht ist selbst eine elektromagnetische Welle.

Damit wurde erstmals eine physikalische Theorie geschaffen, die zwei vormals unabhängige Naturphänomene (Elektrizität, Magnetismus) vereinte. Diese Erkenntnis war ebenso tiefgreifend wie die Newtonsche Mechanik oder später die Relativitätstheorie.

6. Die Bestätigung elektromagnetischer Wellen: Hertz und die Geburtsstunde der Funktechnik

Heinrich **Hertz** (1857–1894) wies 1886–1889 experimentell nach, dass elektromagnetische Wellen existieren und sich genauso verhalten wie Licht. Seine Funkenstrecken-Experimente bestätigten Maxwell vollständig.

Dies war nicht nur ein Triumph der Theorie, sondern bereitete den Weg für die moderne Kommunikationstechnologie. Bereits wenige Jahre später begann Guglielmo Marconi mit den ersten Funkübertragungen.

7. Mathematische Struktur der Maxwellschen Theorie

Die Maxwellschen Gleichungen beschreiben ...

- das Gauss'sche Gesetz der Elektrizität,
- das Gauss'sche Gesetz des Magnetismus,
- das Faradaysche Induktionsgesetz und
- das Ampère-Maxwell-Gesetz.

Zusammen mit der Lorentzkraft ergeben sie eine vollständige Beschreibung ...

- wie Ladungen Felder erzeugen,
- wie Felder auf geladene Teilchen wirken und
- wie sich Felder im Raum ausbreiten.

Die mathematische Eleganz dieser Theorie war so überzeugend, dass sie oft als „die schönste Theorie der klassischen Physik“ bezeichnet wird.

8. Die klassische Elektrodynamik und die Relativitätstheorie

Ende des 19. Jahrhunderts zeigten Experimente wie Michelson-Morley, dass weder ein Äther existiert noch die Lichtgeschwindigkeit von der Bewegung der Quelle abhängt.

Diese Erkenntnisse und Widersprüche führten Albert Einstein 1905 zur Speziellen Relativitätstheorie, deren Ausgangspunkt die Maxwellsche Theorie war. Die Elektrodynamik bleibt vollständig gültig, doch sie ist nicht kompatibel mit der klassischen Newtonschen Mechanik.

Damit bildet die klassische Elektrodynamik eine Brücke zwischen klassischer Physik und moderner Physik.

9. Technologische Folgen der Elektrodynamik

Ohne die klassische Elektrodynamik gäbe es keine ...

- Elektrizitätsnetze,
- Generatoren und Motoren,
- Transformatoren,
- Radio, Radar, Mobilfunk,
- Lichttechnik und Laserphysik (Vorstufe),
- elektronische Geräte aller Art sowie
- Optik moderner Mikroskope, Teleskope etc.

Kaum ein anderer Bereich der Physik hat die moderne Welt stärker geprägt.

10. Abschluss

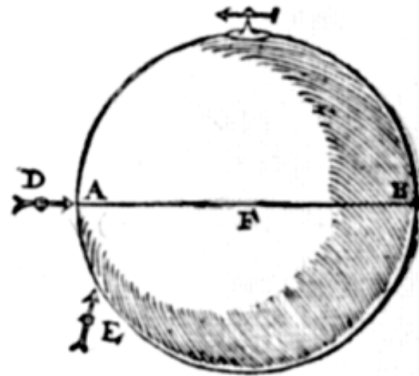
Die klassische Elektrodynamik ist ein Meilenstein der Wissenschaftsgeschichte und ein Paradebeispiel für das Zusammenspiel von Theorie und Experiment. Sie zeigt, wie schrittweise Entdeckungen – von Gilbert bis Faraday – schliesslich in der theoretischen Synthese Maxwells münden konnten. Die Eleganz und Vollständigkeit dieser Theorie machten sie zum Fundament sowohl der modernen Technologie wie auch der Relativitätstheorie.

Bis heute gilt sie als eines der schönsten Resultate der Physik.

William Gilbert (1544–1603)



Gilbert



Gilberts kugelförmiger Magnet „Terrella“ und Magnetnadeln

William Gilbert (1544–1603, Link) war ein englischer Arzt, Naturphilosoph und einer der Begründer der experimentellen Naturwissenschaft in der frühen Neuzeit. Er wirkte als Leibarzt von Elisabeth I. und Jakob I., widmete sich aber vor allem der systematischen Untersuchung magnetischer und elektrischer Phänomene.

- 1600 veröffentlichte er sein Hauptwerk **De Magnete**, das erstmals Magnetismus nicht mehr an mystische Kräfte band, sondern experimentell analysierte.
- Gilbert erkannte, dass die **Erde selbst wie ein riesiger Magnet** wirkt und dass die Richtung der **Kompassnadel** durch dieses globale Magnetfeld bestimmt wird.
- Ebenso unterschied er klar zwischen elektrischen und magnetischen Kräften; er prägte den Begriff „elektrisch“ (vom griechischen „elektron“ = Bernstein).
- Durch Reiben (z.B. an Bernstein) erzeugte Ladungen nannte er „elektrische Anziehung“ und legte damit die **Grundlage zur späteren Elektrostatik**.
- Sein **methodischer Ansatz** – systematisch experimentieren, Hypothesen testen und ordnen – markiert einen Wendepunkt hin zur modernen Physik.
- Gilbert gilt heute als erster bedeutender Elektrizitätsforscher der Geschichte und als Wegbereiter für Coulomb, Faraday und Maxwell.

Magnetismus ist keine mystische Kraft.

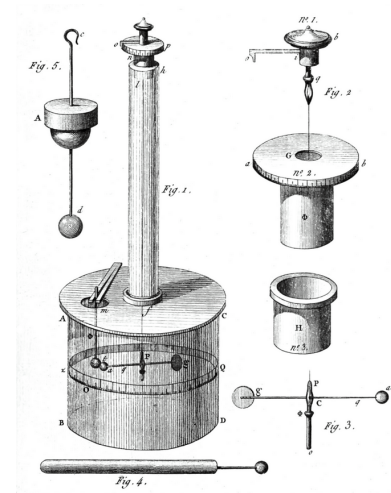
Charles-Augustin de Coulomb (1736–1806)



Coulomb



Nachbau der originalen Coulombschen Drehwaage im Deutschen Museum in München



Charles-Augustin de Coulomb (1736–1806, Link) war ein französischer Militäringenieur und Physiker, der vor allem für die quantitative Analyse elektrischer und magnetischer Kräfte berühmt wurde. Er studierte Mathematik und Bauingenieurwesen, diente weitgehend im Kolonialdienst und widmete sich in seiner Freizeit intensiven physikalischen Experimenten.

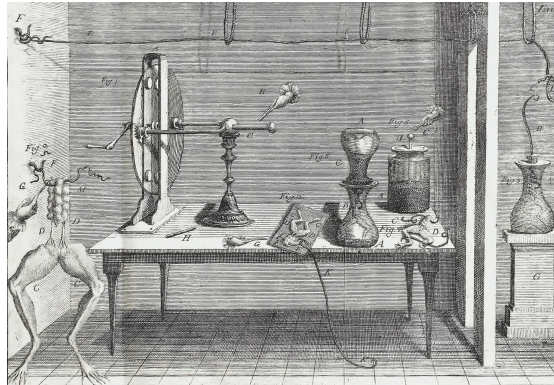
- Seine entscheidende Erfindung war 1785 die **Torsionswaage**, ein extrem empfindliches Messgerät, das es ihm ermöglichte, die Kraftwirkung zwischen elektrisch geladenen Körpern präzise zu bestimmen.
- Zwischen 1785 und 1789 veröffentlichte er seine berühmten Abhandlungen, in denen er das **Coulomb-Gesetz** formulierte: Die elektrische Kraft zwischen zwei Punktladungen ist proportional zum Produkt der Ladungen und umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes.
- Er zeigte ausserdem, dass **ähnliche Gesetzmässigkeiten für magnetische Polen** gelten.
- Coulombs Arbeiten lieferten die mathematische **Grundlage für die Elektrostatik**, beeinflussten Faraday und waren zentral für Maxwells spätere Feldtheorie.
- In der Technik ermöglichte die Anwendung seiner Gesetze den systematischen Aufbau elektrischer Messmethoden und standardisierter Einheiten.

Coulomb Gesetz: $F_C \propto \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$

Luigi Galvani (1737–1798)



Luigi Galvani



Versuchsanordnung des Froschschenkel-Experiments

Luigi Galvani (1737–1798, Link) war ein italienischer Anatom und Physiologe, dessen zufällige Beobachtungen zur „tierischen Elektrizität“ einen Wendepunkt in der Geschichte der Elektrizitätslehre darstellten.

- Beim **Sezieren** eines Froschschenkels bemerkte er **Zuckungen**, sobald ein Metallinstrument den Nerv berührte (Galvanis Froschschenkel-Experiment - 1780er Jahre).
- 1791 veröffentlichte er seine Theorie, dass im tierischen Körper eine eigene Form „elektrischer Lebenskraft“ existiere.
- Auch wenn diese Vorstellung biologisch nicht haltbar war, führte Galvanis Arbeit zu einer revolutionären Erkenntnis: Er zeigte zum ersten Mal zuverlässig, dass elektrische Reize Muskeln aktivieren können.
- Seine Experimente inspirierten Alessandro Volta und lösten die berühmte Kontroverse zwischen „tierischer Elektrizität“ und „Kontaktelektrizität“ aus.
- Galvanis Beobachtungen gelten als **Geburtsstunde der Bioelektrizität** und der späteren **Elektrophysiologie**.

Geburtsstunde der Bioelektrizität und Elektrophysiologie.

Alessandro Volta (1745–1827)



Volta



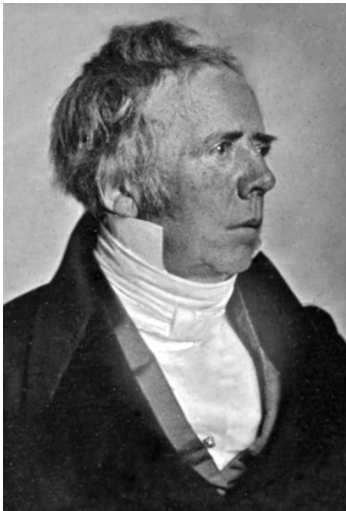
Volta Batterie im Museum Tempio Voltiano in Como

Alessandro Volta (1745–1827, Link) war ein italienischer Physiker und Naturforscher, der die Elektrizitätslehre entscheidend erneuerte.

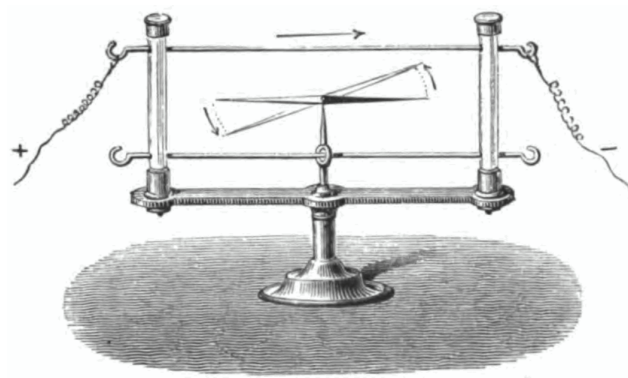
- Er widersprach Galvanis Theorie der tierischen Elektrizität und zeigte, dass elektrische Effekte auch durch den Kontakt unterschiedlicher Metalle entstehen.
- Seine bahnbrechendste Erfindung war 1800 die „**Volta'sche Säule**“, die erste funktionierende **chemische Batterie**. Sie lieferte eine dauerhafte elektrische Spannung und ermöglichte erstmals kontinuierliche elektrische Ströme – ein **epochaler Fortschritt**, der die gesamte Elektrotechnik begründete.
- Volta erforschte zudem elektrische Spannungen, erfand den Elektrophor und prägte Begriffe wie „Kontaktspannung“. Napoleon ehrte ihn mehrfach; später wurde die Einheit der elektrischen Spannung zu seinem Ehren „Volt“ genannt.

Die Volta'sche Säule ermöglichte kontinuierliche Ströme - ein epochaler Fortschritt.

Hans Christian Ørsted (1777–1851)



Ørsted



Ein stromdurchflossener Draht lenkt eine Kompassnadel ab.

Hans Christian Ørsted (1777–1851, Link) war ein dänischer Physiker und Philosoph, der durch eine zufällige, aber präzise beobachtete Entdeckung die Physik revolutionierte.

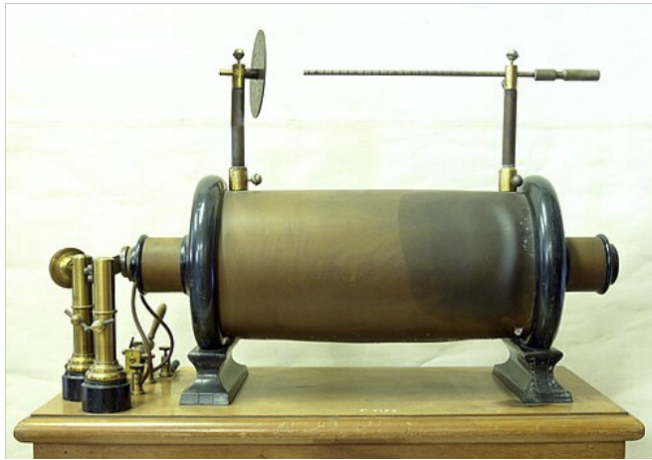
- 1820 bemerkte er, dass eine magnetische Kompassnadel sich bewegt, wenn ein elektrischer Strom in der Nähe fließt. Damit zeigte er erstmals, dass **Elektrizität und Magnetismus miteinander verknüpft** sind.
- Diese Entdeckung war der **Ausgangspunkt für die Elektrodynamik** und inspirierte sowohl Ampère als auch Faraday.
- Ørsted war ein begeisterter Naturphilosoph, der an eine Einheit der Naturkräfte glaubte – seine berühmte Beobachtung bestätigte dieses Weltbild in experimenteller Form.
- Er förderte ausserdem den wissenschaftlichen Unterricht in Dänemark und entdeckte chemisch das Element Aluminium.

Elektrischer Strom erzeugt ein Magnetfeld → Elektromagnetismus.

Michael Faraday (1791–1867)



Michael Faraday



Historischer Induktionsapparat aus dem Physikunterricht (Link)

Michael Faraday (1791–1867, Link) war einer der **bedeutendsten Experimentalphysiker aller Zeiten** – ein Autodidakt aus einfachen Verhältnissen, der durch sein aussergewöhnliches Talent und seine Beharrlichkeit weltberühmt wurde. Ab 1813 arbeitete er in Humphry Davy's Labor und entwickelte sich schnell zu einem innovativen Forscher.

- 1831 entdeckte er die **elektromagnetische Induktion**, also die Erzeugung elektrischer Ströme durch veränderliche Magnetfelder – die **Grundlage aller Generatoren, Motoren und Transformatoren**.
- Faraday formulierte ausserdem die Gesetze der **Elektrolyse**, prägte Begriffe wie Elektrode, Kathode, Anode
- und führte das **Konzept der Kraftlinien** ein, das Maxwell später mathematisch generalisierte.
- Seine Experimente zu **Diamagnetismus** und **Induktivität** formten das moderne Verständnis der Felder.
- Faradays Einfluss auf Elektrotechnik und Energieversorgung kann kaum überschätzt werden.

Induktion: Ein veränderliches Magnetfeld erzeugt eine Randspannung bzw. einen Strom.

James Prescott Joule (1818–1889)



James Prescott Joule



Stromwärme $P = UI$

James Prescott Joule (1818–1889, Link) war ein englischer Physiker und Brauer,

- der die Beziehung zwischen **mechanischer Arbeit, Wärme und Energie** systematisch erforschte.
- In präzisen Experimenten – darunter sein berühmtes „**Fallrad-Experiment**“ – bestimmte er das **mechanische Wärmeäquivalent** und zeigte, dass Wärme eine Form der Energie ist.
- Dies legte das **Fundament des Ersten Hauptsatzes der Thermodynamik**.
- Joule erforschte auch **elektromagnetische Erwärmung** und formulierte das **Joule'sche Gesetz über die Wärmeentwicklung im Leiter**.
- Seine Arbeit verband Mechanik, Elektrizität und Wärmelehre zu einer einheitlichen Energetik.

Die Stromwärme: $P = UI$

James Clerk Maxwell (1831–1879)



| |
|---|
| $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ |
| $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ |
| $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ |
| $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$ |

James Clerk Maxwell

Maxwellsche Gleichungen

James Clerk Maxwell (1831-1879, Link) zeigte bereits in jungen Jahren eine aussergewöhnliche mathematische Begabung. Er studierte zunächst an der Universität Edinburgh und später am Trinity College der University of Cambridge, wo er sich intensiv mit Mathematik und Physik beschäftigte. Nach seinem Studium war Maxwell als Professor an verschiedenen Universitäten tätig, unter anderem in Aberdeen und London, bevor er 1871 zum ersten Professor für Experimentalphysik an der University of Cambridge berufen wurde. Wissenschaftlich ist Maxwell vor allem durch seine Arbeiten zur **Elektrodynamik** bekannt. Er leistete aber auch Bahnbrechendes in anderen Gebieten ...

- Mit den nach ihm benannten **Maxwellschen Gleichungen** gelang es ihm, die bis dahin getrennt behandelten Phänomene der Elektrizität und des Magnetismus zu einer einheitlichen **Feldtheorie** zu vereinen.
- Aus diesen Gleichungen folgte er theoretisch die Existenz **elektromagnetischer Wellen** und erkannte, dass **Licht** selbst eine elektromagnetische Welle ist. Damit verband Maxwell erstmals Optik und Elektromagnetismus auf grundlegende Weise.
- Darüber hinaus führte er den Begriff des **elektromagnetischen Feldes** als physikalisch reale Grösse ein und löste sich damit von der rein mechanischen Vorstellung von Fernwirkungen.
- Er lieferte auch bedeutende Beiträge zur **kinetischen Gastheorie**, insbesondere durch die Einführung der statistischen Beschreibung von Teilchenbewegungen, die in der **Maxwell-Boltzmann-Verteilung** ihren Ausdruck findet.
- Zudem beschäftigte er sich mit Fragen der **Farbenlehre** und zeigte experimentell, dass sich alle Farben aus einer Kombination von Rot, Grün und Blau erzeugen lassen.

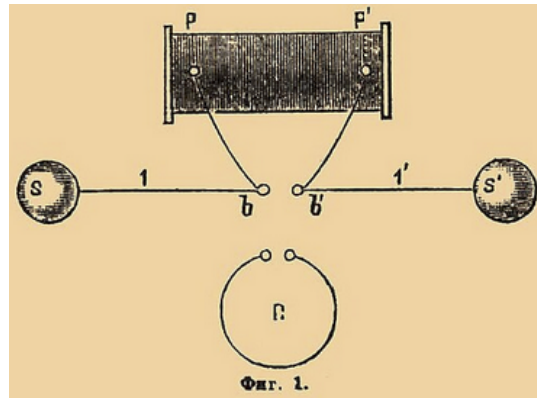
Maxwells Arbeiten markieren einen Wendepunkt in der Physik des 19. Jahrhunderts und bereiteten den Weg für zentrale Entwicklungen der modernen Physik, insbesondere für die Relativitätstheorie und die Quantenphysik.

Licht ist eine elektromagnetische Welle.

Heinrich Hertz (1857–1894)



Heinrich Hertz



Hertz'sche Versuchsanordnung

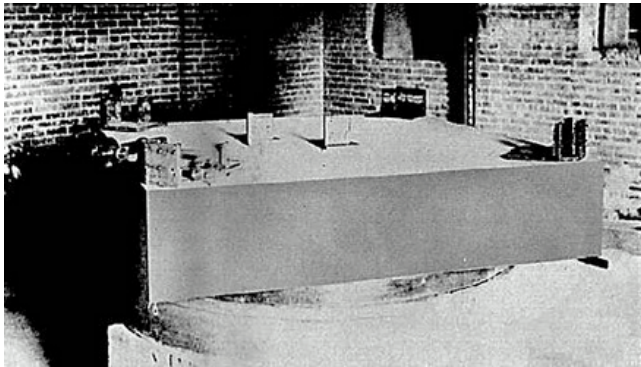
Hertz'sche Versuchsanordnung mit Funkeninduktor und durch Kugeln kapazitiv verlängerter Dipol-Sendeantenne sowie unterbrochenem Metallring als Empfangsantenne.

Heinrich Hertz (1857–1894, Link) war ein deutscher Physiker, dem im Jahre 1887 der **experimentelle Nachweis elektromagnetischer Wellen** gelang – ein Meilenstein der Physik.

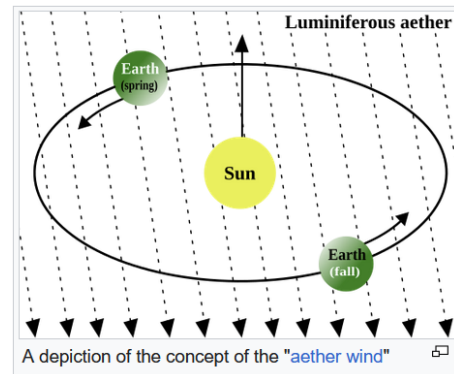
- Aufbauend auf Maxwells Theorie erzeugte er in den 1880er Jahren **Hochfrequenzschwingungen** und zeigte, dass sie **wie Licht** reflektieren, brechen und interferieren.
- Damit bewies er die **Existenz der elektromagnetischen Wellen**, die Maxwell theoretisch vorhergesagt hatte.
- Hertz war zudem ein brillanter Apparatebauer; seine Resonatoren und Funkenstrecken waren wegweisend für spätere Technologien.
- Obwohl er die technische Bedeutung seiner Entdeckung selbst unterschätzte, ist sie die **Grundlage für Funk, Radio, Radar und drahtlose Kommunikation (WLAN)**.

Die von Maxwell theoretisch vorausgesagten elektromagnetischen Wellen existieren.

Albert A. Michelson und Edward Morley



Michelson - Morley's Interferometer (Link)



Konzept des Äther-Winds (Link)

Albert A. **Michelson** (1852-1931, [Link](#)) und Edward W. **Morley** (1838-1923, [Link](#)) führten eines der berühmtesten Experimente der Physikgeschichte durch: das **Michelson-Morley Experiment** ([Link](#)) im Jahre 1887.

- Ihr Interferometer sollte die Bewegung der Erde durch den hypothetischen „Lichtäther“ (den man als Träger der Lichtwellen annahm) nachweisen.
- Das Ergebnis war jedoch ein **Nullresultat**: d.h keine messbare Ätherbewegung.
- Dieses Resultat **stellte die klassische Physik** infrage und wurde später zu einem entscheidenden **Baustein für Einsteins Spezielle Relativitätstheorie**.
- Michelson-Morley konnten mit ihrem Interferometer auch erstmals präzise Messungen der **Feinstrukturaufspaltung** bei Atomspektren durchführen.
- **Michelson** beschäftigte sich in seinen Experimenten vor allem mit der Messung der Lichtgeschwindigkeit.
- **Morley** war ein begnadeter Experimentator. Morley arbeitete auch über die chemische Zusammensetzung der Erdatmosphäre, thermischer Ausdehnung und die Lichtgeschwindigkeit in einem Magnetfeld. Ausserdem bestimmte er das Verhältniss von Sauerstoff zu Wasserstoff mit damals unübertroffener Genauigkeit.

Es gibt keinen Äther. Die elektromagnetischen Wellen brauchen keinen Träger.

Anhang

Anhang A Quellen

Bei der Erstellung dieses Skripts wurden v.a. die folgenden Quellen benutzt ...

- Wikipedia (sowohl die deutschen als auch die englischen Seiten)
 - Bei jedem Physiker ist als Link die deutsche Wikipedia-Seite angegeben. Es lohnt sich in vielen Fällen auch die Wikipedia-Seiten in anderen Sprachen zu konsultieren (z.B. die englische). Diese Links sind jedoch nicht angegeben, da sie via die deutsche Wikipedia-Seite schnell aufgerufen werden können.
- Carlo Rovelli, “Die Geburt der Wissenschaft - Anaximander und sein Erbe”, 2019, Rowohlt
- Für Zusammenfassungen und Übersichten wurde als Ausgangspunkt auch ChatGPT (chatgpt.com) verwendet.