

4

BIOTECHNOLOGIE

IN DIESEM KAPITEL GEHT ES UM

Biotechnologie

Mikroorganismen und Zellen

Stammhaltung und
Konservierung

Sterilisation und Desinfektion

Fermentation

industrielle Anwendungen



4.1 Bereiche der Biotechnologie (*biotechnology*)

Schon lange, bevor Mikroorganismen entdeckt wurden, verwendete der Mensch unbewusst Biotechnologie, z. B. für die Herstellung von **Brot**, **Bier** und **Wein**, von **Essig** sowie bei **Milchprodukten**.

Die **Biotechnologie** ist die Wissenschaft, die sich mit der **Herstellung von chemischen Verbindungen** mithilfe von **Mikroorganismen** befasst (**Abb. 83.1**). Mikroorganismen wandeln Nährstoffe **enzymatisch** um und produzieren so das gewünschte **Endprodukt**. Häufig werden genetisch veränderte (transgene) Mikroorganismen oder tierische und pflanzliche Zellen eingesetzt.

Nach den Anwendungsgebieten unterscheidet man vier Bereiche der Biotechnologie.

Bereich	Beschreibung und Produkte
weiße Biotechnologie	industrielle Biotechnologie, z. B. Herstellung von Lebensmitteln, Chemikalien, Enzymen oder Vitaminen
grüne Biotechnologie	pflanzliche Biotechnologie, z. B. Herstellung von Futtermitteln und Biomasse
graue Biotechnologie	Umweltbiotechnologie, z. B. zur Reinigung von Abwasser, Luft oder Boden
rote Biotechnologie	medizinische Biotechnologie, z. B. zur Herstellung von Arzneimitteln wie Antibiotika und Impfstoffe

Tabelle 83.1 Arten der Biotechnologie

Die Verwendung von Mikroorganismen hat vielfach Vorteile gegenüber klassischen chemischen Synthesen. Diese Vorteile umfassen ...

- die Einsparung von Rohstoffen und Energie,
- einfachere Herstellungsprozesse und
- die Vermeidung bzw. Reduktion von Abfall- und Nebenprodukten.

4.2 Mikroorganismen und Zellen

Die Biotechnologie arbeitet mit lebensfähigen **Mikroorganismen** bzw. **tierischen und pflanzlichen Zellkulturen**. Da die Handhabung von Zellkulturen besonders aufwendig ist, werden diese vor allem in der medizinischen Biotechnologie verwendet. Die **Mikroorganismen** der Biotechnologie sind **Bakterien** sowie **Hefe-** und **Schimmelpilze**.

Voraussetzung für die Verwendung dieser Organismen ist, dass sie ungiftig und keine Krankheitserreger sind. Oft werden Mikroorganismen **gentechnisch verändert**, damit sie entweder keine Krankheit auslösen oder außerhalb des Labors nicht überlebensfähig sind. Man spricht von **gentechnisch veränderten Organismen** (GVO). Nur etwa 100 der mehreren Millionen Arten von Mikroorganismen kommen in der Biotechnologie zum Einsatz.

Tierische und **pflanzliche Zellkulturen** werden zur Herstellung von **rekombinanten Proteinen** verwendet. Rekombinant bedeutet, dass die Zellen durch gentechnische Veränderung **Proteine herstellen** können, die sie von Natur aus nicht produzieren würden (**Seite 98**). Solche Proteine sind wichtige medizinische Wirkstoffe, darunter Enzyme, Hormone und Impfstoffe.

In der Biotechnologie werden **Zelllinien** verwendet. Diese Zelllinien bestehen aus **immortalisierten Zelltypen**. Der Prozess der **Immortalisierung** hebt durch künstliche Infektion mit Viren oder Tumorzellen die natürliche Begrenzung der Zellteilungsrate auf. Diese Zellen sind in der Lage, sich unbegrenzt zu vermehren. Die wichtigste Zelllinie ist jene aus dem Eierstock des chinesischen Hamsters (**chinese hamster ovary, CHO**). Über 70 % der Wirkstoffe werden mit Zellkulturen dieser Zelllinie hergestellt.

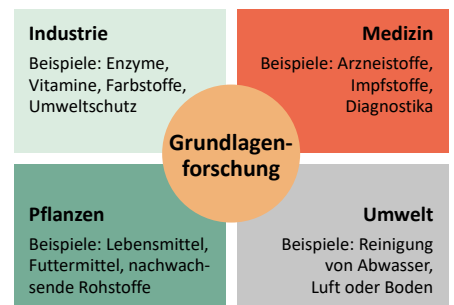


Abb. 83.1 Anwendungsbereiche der Biotechnologie



Abb. 83.2 Insulin, für Diabetikerinnen und Diabetiker lebenswichtig, wird mithilfe gentechnisch veränderter Bakterien oder mit Hefepilzen erzeugt.

Bakterien	Produkt
Bacillus subtilis	Vitamin B2
Escherichia coli	Humaninsulin
Lactobacillus casei	Milchsäure
Pseudomonas putida	Aspartam
Clostridium acetobutylicum	Butanol, Aceton
Zymomonas mobilis	Ethanol

Tabelle 83.2 Ausgewählte Beispiele zum Einsatz von Bakterien in der Biotechnologie

Hefe-/Schimmelpilz	Produkt
Saccharomyces cerevisiae	Backhefe, Ethanol, Humaninsulin
Penicillium chrysogenum	Penicillin
Aspergillus niger	Zitronensäure

Tabelle 83.3 Ausgewählte Beispiele von Pilzen in der Biotechnologie



Abb. 83.3 Backhefe

4.3 Stammhaltung und Konservierung (strain maintenance and conservation)



Abb. 84.1 Agar-Nährmedienplatten für Bakterien



Abb. 84.2 Pilzsporen in einer Petrischale



Abb. 84.3 Die Herstellung von gefriergetrockneten Erdbeeren und ähnlichen Lebensmitteln folgt dem gleichen Prozess wie die Trockenkonservierung.



Abb. 84.4 Kryokonservierung von Mikroorganismusstämmen in Speziallaboren



Abb. 84.5 Auch in der Medizin müssen Arbeitsgeräte steril, also keimfrei, sein.

Die Mikroorganismen und Zelllinien sind der wichtigste Bestandteil der biotechnologischen Produktion. Ihre Stammhaltung und Konservierung sind daher von großer wirtschaftlicher Bedeutung.

Als **Stamm** bezeichnet man die reine Kultur eines Mikroorganismus oder einer Zellkultur mit einer klar definierten Herkunft. Zur Erhaltung des Stamms, der **Stammhaltung**, muss die Stoffwechselaktivität der Zellen je nach Bedarf verlangsamt oder sogar gestoppt und wieder beschleunigt werden.

Für die **kurzfristige Verfügbarkeit** werden Mikroorganismen oder Zellkulturen in regelmäßigen Abständen auf Nährmedien wie Nähragarplatten (Abb. 84.1, Abb. 84.2) aufgebracht und bis zu ihrer Verwendung im Kühlschrank gelagert. Diese Methode heißt **periodisches Überimpfen**. Sie ist allerdings recht aufwendig und die Haltbarkeit der Stämme beträgt ungefähr ein Jahr.

Für die längerfristige **Konservierung** werden drei Verfahren verwendet: die **Konservierung in inerten Flüssigkeiten**, die **Trockenkonservierung** und die **Gefrierkonservierung**.

Manche Mikroorganismen lassen sich in hydrophoben Flüssigkeiten wie Paraffinöl bis zu 5 Jahre im Kühlschrank lagern. Die hydrophobe Eigenschaft des Öls verhindert das Austrocknen und schützt vor äußeren Einflüssen.

Die **Trockenkonservierung** erfolgt meist in **Lyophilisatoren** (Gefriertrocknern). Die Mikroorganismen werden darin zunächst eingefroren. Das gefrorene Wasser wird durch Vakuum sublimiert und den Mikroorganismen entzogen. Der Restfeuchtegehalt beträgt 0,2 % bis 5 % w(H₂O) (Abb. 84.3). Die Lagerung erfolgt, als **Starterkulturen** portioniert, in Glasampullen oder dicht verschweißten Beuteln bei 4 °C in Kühlräumen. Mikroorganismen sind so 6 Jahre und länger haltbar.

Bei der **Gefrierkonservierung** (Kryokonservierung) werden Mikroorganismen unter Tiefsttemperaturen gelagert. In Tiefstkühlschränken bei -80 °C sind sie mehr als 10 Jahre überlebensfähig, in der Dampfphase von flüssigem Stickstoff bei unter -150 °C mindestens 50 Jahre (Abb. 84.4).

4.4 Sterilisation und Desinfektion

Bei der Arbeit mit Mikroorganismen liegt ein besonderes Augenmerk auf der Vermeidung von Kontamination (Verunreinigung) mit fremden Keimen, um eine gesicherte Produktion zu gewährleisten. Sterile Bioreaktoranlagen, Arbeitsgeräte, Vorratsgefäße und Nährmedien sind daher eine Grundvoraussetzung für die biotechnologische Produktion.

4.4.1 Sterilisation (sterilisation)

Steril bedeutet **frei von lebensfähigen Keimen**. Unter Keim versteht man in der Medizin **Krankheits- oder Infektionserreger**, also Mikroorganismen und Viren. Die **Sterilisation** soll alle Keime, unabhängig von ihrer Wirkung, abtöten. Auch das Abtöten von **Sporen**, dem Ruhezustand von Pilzen, ist Ziel der Sterilisation.

Im Zuge der Sterilisation werden alle Gegenstände und Arbeitsstoffe entkeimt, also von lebensfähigen Mikroorganismen befreit. Sie sollen auch vor der **Kontamination** mit Keimen geschützt werden. Die Sterilisation erfolgt durch **feuchte Hitze**, **trockene Hitze** und **Gase**.

Dampfsterilisation (moist heat sterilization)

Die sicherste Methode ist die **Dampfsterilisation** (feuchte Hitze). Bei Temperaturen ab 115 °C werden alle Mikroorganismen abgetötet. Mit Heißdampf lässt sich eine gesamte Reaktoranlage entkeimen.

Andere Geräte und Gegenstände werden in eigenen Druckbehälter, **Autoklaven**, sterilisiert (**Abb. 85.1**). Temperatur und Zeit der Sterilisation sind auf die Art und Anzahl der Keime abgestimmt (**Tabelle 85.1**). Wichtig dabei ist, dass die gesamte Luft durch Wasserdampf verdrängt wird.

Heißluftdesinfektion (*dry heat sterilization*)

Die **Heißluftdesinfektion** (trockene Hitze) findet in Trockenschränken bei Temperaturen über 160 °C statt. Sie eignet sich vor allem für Gegenstände aus Glas und Metall (**Abb. 85.2, Tabelle 85.2**).

Desinfektion mit Gas (*gas sterilization*)

Temperaturempfindliche Materialien, vor allem solche aus Kunststoff, müssen chemisch durch Gase wie **Ethylenoxid** und **Formaldehyd** sterilisiert werden. Wegen der Giftigkeit und der krebserregenden Wirkung der Gase sind besondere betriebliche Kenntnisse erforderlich. Der Vorteil besteht darin, dass auch verpacktes Material sterilisiert werden kann.

4.4.2 Desinfektion (*desinfection*)

Arbeitskleidung, Atemluft und die Haut der Menschen im Biotechnologiebetrieb lassen sich aus verständlichen Gründen nicht sterilisieren. Deshalb müssen krankheitsserregende Keime durch **Desinfektion** abgetötet werden.

Physikalische Desinfektion (*physical desinfection*)

Als physikalische Desinfektion kommen vorwiegend das **Auskochen**, z. B. von Arbeitskleidung, und die **Dampfdesinfektion** bis 105 °C zum Einsatz.

Aus der Lebensmittelindustrie kennt man zudem das **Pasteurisieren** (z. B. von Milch, **Abb. 85.3**). Darunter versteht man das kurzzeitige Erhitzen auf 60 °C bis 85 °C. Für keimfreie H-Milch wird im **Ultrahochtemperatur-Verfahren** (UHT) für einige Sekunden auf 150 °C erhitzt.

Oberflächen, Räume oder Flüssigkeiten werden auch mit **UV-Strahlen** desinfiziert.

Chemische Desinfektion (*chemical desinfection*)

Haut (z. B. die Hände) und Oberflächen werden mit **flüssigen Desinfektionsmitteln** entkeimt. Dazu eignen sich wegen ihrer schnellen keimtötenden Wirkung vor allem Alkohole wie Ethanol und Propanol.

Gasförmige Desinfektionsmittel sind auch bei der Entkeimung der Raumluft (v. a. durch Ozon, **NAWI 2, S. 140**) und von Trink- und Badewasser (v. a. durch Chlor, **NAWI 2, S. 90**) erforderlich.



Abb. 85.1 Beladung eines Autoklaven für die Dampfsterilisation von Gegenständen



Abb. 85.2 Vorbereitung einer Heißluftsterilisation

Temperatur	Dampfdruck	Zeit
121 °C	2 bar	> 20 min
134 °C	3 bar	> 5 min

Tabelle 85.1 Bedingungen der Dampfsterilisation im Autoklaven

Temperatur	Zeit
160 °C	> 200 min
180 °C	> 30 min
240 °C	> 10 min

Tabelle 85.2 Bedingungen der Heißluftsterilisation



Abb. 85.3 Pasteurisation von Milch

MERK & WÜRDIG

Arten der Biotechnologie

- **Weißer Biotechnologie:** industrielle Biotechnologie (Chemikalien, Enzyme, Vitamine)
- **Grüne Biotechnologie:** pflanzliche Biotechnologie (Lebensmittel, Futtermittel, Biomasse)
- **Graue Biotechnologie:** Umweltbiotechnologie (Reinigung von Abwasser, Luft und Boden)
- **Rote Biotechnologie:** medizinische Biotechnologie (Wirkstoffe, z. B. für Medikamente und Impfstoffe)

Produktionsorganismen

- **Mikroorganismen:** gentechnisch veränderte Organismen (GVO), Bakterien, Hefe- oder Schimmelpilze
- **Zellkulturen:** immortalisierte Zellen ohne natürliche Begrenzung der Vermehrungsrate
- **Stammhaltung:** Kontrolle des Wachstums der Mikroorganismen durch Temperatur und Lagerung
- **Konservierung:** Trockenkonservierung und Gefrierkonservierung

Sterilisation

- **Entkeimung und Verhinderung von Kontamination** mit Keimen
- **Methoden:** Dampfsterilisation, Heißluftdesinfektion und durch Gase (Ethylenoxid und Formaldehyd)

Desinfektion

- **Abtötung** oder **Reduktion** krankheits-erregender Keime
- **Methoden:** Dampfdesinfektion, Pasteurisieren und UHT-Verfahren sowie flüssige (Alkohole) oder gasförmige Desinfektionsmittel (Ozon, Chlor)

ÜBUNGEN

Bei der Bearbeitung der folgenden Übungen testest du deine grundlegenden Kenntnisse der Biotechnologie und ihrer Einsatzstoffe.

Ü 4.1

Arbeitsorganismen. Erkläre, welche Gemeinsamkeit Bakterien, Pilze und Zelllinien in der Biotechnologie verbindet.

Ü 4.2

Rote Biotechnologie. Recherchiere im Internet, welche Impfstoffe biotechnologisch hergestellt werden.

Ü 4.3

Sterilisation. Recherchiere in Internet und Fachliteratur, welche Keimzahlen für den Begriff „steril“ zulässig sind bzw. welche Keimzahlreduktion mit Desinfektion erzielt werden muss.

Ü 4.4

Sterilisation. Erkläre, warum Fermenter und Nährlösung bei der Durchführung von Fermentationen steril sein müssen.

4.5 Fermentation (*fermentation*)



Abb. 86.1 Laborfermenter aus Edelstahl

Fermentation (lat.: *fermentum* = Gärung) ist die enzymatische Umwandlung organischer Stoffe. Dies geschieht durch Mikroorganismen in **Bioreaktoren** (*bioreactors*), den Fermentern. Für die Fermentation werden oft auch nur isolierte Enzyme von Mikroorganismen oder Zelllinien verwendet (vgl. **Kapitel 4.2**).

Ein **Fermenter** ist ein geschlossenes Gefäß, in dem die Mikroorganismen unter kontrollierten Bedingungen gezüchtet werden (**Abb. 86.1**). Er enthält eine entsprechende Nährlösung. Wir unterscheiden zwei Arten der Fermentation:

- **aerobe Fermentation** (mit Sauerstoff) und
- **anaerobe Fermentation** (ohne Sauerstoff).

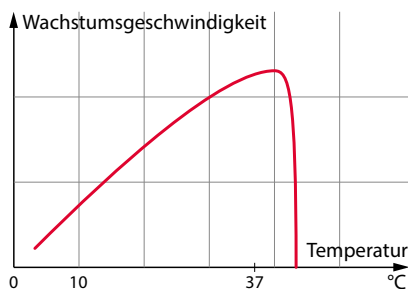


Abb. 86.2 Wachstumsgeschwindigkeit von Bakterien als Funktion der Temperatur

4.5.1 Wachstumsfaktoren (*growth factors*)

Das Wachstum der Mikroorganismen im Fermenter ist abhängig vom **Nährmedium**, von **Temperatur** und **pH-Wert** sowie vom **Sauerstoff**.

Nährmedium (*nutrient medium*)

Das **sterile Nährmedium** ist die **Nahrungsquelle** der Mikroorganismen oder Zellen bei der Fermentation. Es ist eine **wässrige Lösung** mit folgenden Inhaltsstoffen:

- Eine Kohlenstoffquelle (Substrat) dient gleichzeitig als Energielieferant.
- Zusätzlich werden Mineralstoffe (N, P, S) und ...
- Spurenelemente sowie Aktivatoren (Vitamine, Hormone) zugesetzt.

Technische Nährmedien bestehen meist aus Melasse oder Maisquellwasser, Nebenprodukte der Zucker- oder Maisstärkeherstellung. Beide Kohlenstoffquellen sind preiswert und in großer Menge verfügbar.

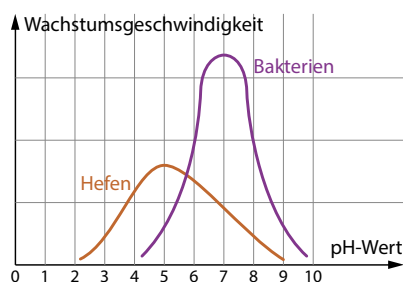


Abb. 86.3 Wachstumsgeschwindigkeit von Bakterien/Viren als Funktion des pH-Werts

Temperatur, pH-Wert, Sauerstoff (*temperature, pH-value, oxygen*)

Die Betriebstemperatur der Fermentation hängt von dem Organismus ab, der eingesetzt wird. Die **optimale Temperatur** für Bakterien und Säugerzellen liegt bei 37 °C (**Abb. 86.2**), jene für Pilze wie etwa Hefe bei circa 30 °C.

Während Bakterien und Säugerzellen einen neutralen pH-Wert von 7,0 bis 7,4 bevorzugen, arbeiten Pilze bevorzugt in einem sauren pH-Bereich (**Abb. 86.3**).

Die Art des Mikroorganismus bestimmt, ob Sauerstoff zugegeben werden muss. Es wird unterschieden in **strikte Aerobier** (mit Sauerstoff), **strikte Anaerobier** (ohne Sauerstoff) und wahlweise bzw. **aerotolerante Anaerobier** (Beispiele in **Tabelle 86.1**).

Die alkoholische Gärung durch Hefepilze ist ein anaerober Prozess. Der mikrobielle Abbau von Biomasse im Abwasser im Belebtschlammbecken ist aerob.

O ₂ -Typ	Beispiel
Strikter Aerobier	Penicillium chrysogenum
Wahlweise Anaerobier	Escherichia coli
	Milchsäurebakterien
	Backhefe

Tabelle 86.1 Beispiele für Mikroorganismen und ihren Sauerstoffbedarf

4.5.2 Aufbau eines Bioreaktors (*general structure of a fermenter*)

Während der Produktion sollen optimale Wachstumsbedingungen herrschen. Daher sind an einem **Bioreaktor** (Fermenter) eine Vielzahl von Anschlüssen vorgesehen. Alle Daten, darunter der Füllstand, der Mediendurchfluss, der pH-Wert und die Temperatur, werden durch **Messfühler** (Sensoren) im Fermenter gemessen und über eine Elektronik ständig geregelt (**Abb. 87.1, Abb. 87.3, Abb. 87.4**).

Techniken zur Optimierung der Wachstumsbedingungen

- **pH-Wert:** Bei pH-Änderungen (z. B. aufgrund der Stoffwechselaktivität) wird automatisch eine Säure oder Base zugefügt, bis der pH-Wert wieder den Normalwert erreicht hat.
- **Temperatur:** Die Temperatur wird durch Kühlen oder Wärmen konstant gehalten. Reaktoren sind dafür oft doppel- oder mehrwandig ausgeführt.
- **Durchmischung:** Es wird gerührt, um die Mikroorganismen an jedem Ort im Bioreaktor optimal mit Nährstoffen und Sauerstoff zu versorgen; gleichzeitig werden so Abfallstoffe entsorgt. Rühren gewährleistet überdies den Wärmeaustausch.
- **Medien:** Ein steriles Nährmedium und Luft (bei aerobem Prozess; unterhalb des Rührers) werden automatisiert zugeführt. CO₂ bzw. Stickstoff und ungenutzter Sauerstoff verlassen den Fermenter durch eine Abgasleitung.
- **Schaumkontrolle:** In einer gerührten und begasten Fermentation bildet sich an der Oberfläche Schaum (**Abb. 87.2**). Zuviel Schaum birgt das Risiko, dass der Reaktor nicht optimal gefüllt ist und sich das Nährmedium oder die Mikroorganismen im Schaum anreichern. Dann liegen keine optimalen Fermentationsbedingungen vor. Zur Schaumkontrolle werden oft Öle (z. B. Rapsöl) zugeführt. Rotierende Schaumzerstörer am Deckel des Fermenters reduzieren ebenso die Schaummenge.

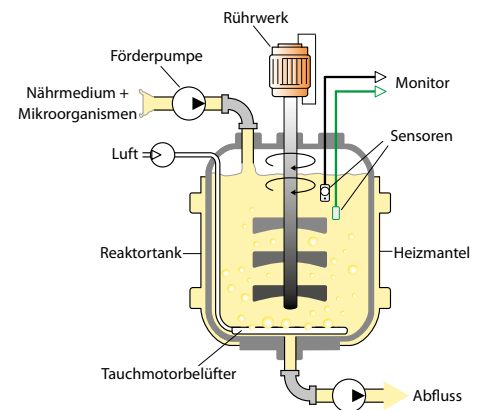


Abb. 87.1 Aufbau eines Fermenters



Abb. 87.2 Schaumbildung im Belebtschlammbecken einer Kläranlage



Abb. 87.3 Laborfermenter aus Glas



Abb. 87.4 Kontrolle der Prozessparameter am Fermenter

4.5.3 Fermentationsablauf (*process of fermentation*)

1. Schritt

Apparaturen und Nährlösung werden **sterilisiert**. Dann wird eine geringe Menge der verwendeten **Mikroorganismen** in die **Nährlösung** gegeben. Man sagt: Die Nährlösung wird mit den Bakterien oder Pilzen **angepflegt**.

2. Schritt

Die **Mikroorganismen vermehren** sich und **produzieren** das gewünschte **Endprodukt**. Die Fermentation kann auf zwei Arten durchgeführt werden:

- Bei der **diskontinuierlichen Fermentation (Batch-Fermentation)** fügt man während der Fermentation keine frische Nährlösung zu. Sind die Nährstoffe verbraucht, ist die Fermentation abgeschlossen.
- Bei der **kontinuierlichen Fermentation** wird laufend Nährlösung aus dem Fermenter entnommen und durch frische ersetzt.

3. Schritt

Das gewünschte **Produkt** wird aus der verbrauchten Nährlösung **abgetrennt** und aufgearbeitet (gereinigt, portioniert etc.).

MERK & WÜRDIG

Fermentation: enzymatische **Umwandlung organischer Stoffe** mithilfe von **Mikroorganismen**, ihrer isolierten Enzyme oder Zelllinien

Sauerstoff-Typ der Fermentation: **aerob** (mit Luftzufuhr) oder **anaerob** (ohne Luftzufuhr)

Nährmedium: C-Quelle als Energielieferanten (Melasse, Maisquellwasser), Mineralstoffe, Spurenelemente, Vitamine, Hormone

Temperatur, pH-Wert: Bakterien und Zellen (37 °C, pH 7,0 – 7,4), Pilze (30 °C, pH 4,0 – 6,0)

Prozesskontrolle: pH-Wert, Temperatur, Ab- und Zufuhr des Nährmediums, Homogenisierung (Rühren), Schaumkontrolle

Fermentationsablauf:

- Reinigung und Sterilisation
- Impfen des Nährmediums
- Füllen und Betrieb
- Abtrennung des Produkts

5

DIE MODERNE PHYSIK

IN DIESEM KAPITEL GEHT ES UM

Raum und Zeit

Masse und Energie

Antimaterie

Schwarze Löcher

die Welt der Quanten

Radioaktivität

Kernspaltung und Kernfusion

Wechselwirkungen

die kleinsten Bausteine
der Materie

5.1 Einführung in die moderne Physik

(introduction to modern physics)

Die klassische Physik

Die klassische Physik des 19. Jahrhunderts war davon geprägt, **alle Aspekte des Naturgeschehens** mit **mechanischen Modellen** zu erklären. Ihr tatsächlicher Siegeszug wurde vor allem in den technischen Anwendungen sichtbar.

Wissenschaft und Technik wirkten zusammen: Dies veränderte den Alltag und bildete das Rückgrat der **Industriellen Revolution**.

Die Krise der klassischen Physik

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts beobachtete man Phänomene, die **nicht** mehr mit den klassischen Modellvorstellungen **erklärbar** waren. Einige Fragen wiesen auf **Lücken der klassischen Physik** hin:

- Wie kann man das **Linienspektrum des Wasserstoffs** erklären?
- Welche physikalische Erklärung steht hinter dem **Strahlungsspektrum eines Schwarzen Körpers**? Die klassische Theorie sagte eigentlich eine „UV-Katastrophe“ (Seite 123) voraus, die natürlich nicht eintrat.
- Woher stammt die rätselhaft **hohe Energie**? Kathodenstrahlen, Röntgenstrahlen, Radioaktivität (**Abb. 101.1**) – viele neu entdeckte Phänomene konnten nicht in die alten Konzepte eingebunden werden.
- Bewegt sich die Erde durch den **Äther**? Das Experiment des Physikers Albert Michelson (1852 – 1931) im Jahr 1881 ergab ein Null-Ergebnis für die Geschwindigkeit der Erde gegen diesen hypothetischen Äther.

Die moderne Physik ist schon alt

Die **moderne Physik** ist deutlich mehr als 100 Jahre alt. Sie gibt Antworten auf Fragen, die im Rahmen der klassischen Theorien nicht beantwortbar waren. Kernstücke der modernen Physik sind die **Relativitätstheorien** und die Theorien der **Quantenmechanik**.

Diese physikalischen Konzepte sind deshalb **modern**, weil sie einen **Bruch mit den Vorstellungen der klassischen Physik** darstellen. So benötigten die Relativitätstheorien eine **neue Raum- und Zeitvorstellung**.

Die Quantentheorie lässt sich in wesentlichen Belangen überhaupt nicht mehr in ein Korsett anschaulicher Modelle zwingen: Sie ist **nicht vorstellbar**, aber sie ist **mathematisch darstellbar**.

Heute sind manche Theorien der modernen Physik bereits als alt anzusehen. So wie seinerzeit die klassischen Theorien können auch heute nicht alle entdeckten Phänomene mit den Theorien der modernen Physik erklärt werden. Für Physikerinnen und Physiker gibt es also weiterhin genug zu tun.

Die Fragen nach dem Warum

Im Rahmen der modernen Physik stößt man an **Grenzfragen**. Traditionell war oft die **Frage nach der Ursache** eines bestimmten Phänomens der Anstoß zur wissenschaftlichen Arbeit. So wurde beispielsweise die Kraft als Ursache einer Bewegungsänderung angesehen.

Fragen nach der Ursache sind weiterhin wichtig, aber **in Teilbereichen** der Naturwissenschaft **nicht sinnvoll**. Fragen nach dem Warum gehen davon aus, dass etwas eine Ursache haben muss. Gibt es aber keine Ursache, ist die Frage sinnlos. In der Quantenphysik treten Phänomene ohne Ursache auf: Man spricht vom **reinen Zufall**.

Aus aktueller naturwissenschaftlicher Sicht können Fragen nach dem Warum durchaus unbeantwortet bleiben. Naturgemäß ist das manchmal recht unbefriedigend.

„Ich bin niemals zufrieden, bevor ich ein mechanisches Modell des Gegenstandes konstruiert habe.“

LORD KELVIN (1824 – 1907)

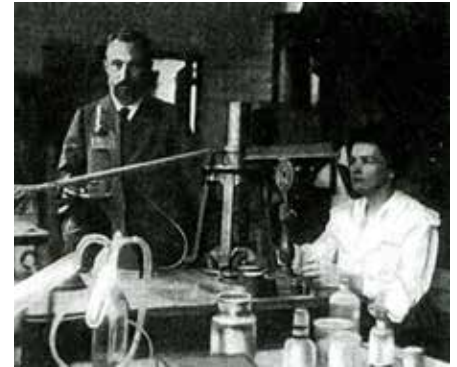


Abb. 101.1 Marie Skłodowska-Curie und Pierre Curie in ihrem Labor: Marie Curie war Pionierin auf dem Gebiet der Radioaktivität.

ERGÄNZUNG & AUSBLICK

Der Höhenrausch der klassischen Physik

Eine kurze Anekdote veranschaulicht den so genannten Höhenrausch der klassischen Physik.

1874 erkundigte sich Max Planck, damals gerade 16 Jahre alt, bei Philipp von Jolly nach den Aussichten eines Physikstudiums. Dieser riet ihm dringend von der Studienrichtung ab: „In der Physik sei im Wesentlichen schon alles erforscht, und es gäbe nur noch einige Lücken auszufüllen.“

Planck entschloss sich trotz dieser Warnung zu einem Physikstudium. Wenige Jahre später führte er die **Energiequanten** ein und leitete damit die Geburt der Quantenmechanik ein: Diese widerpricht den mechanischen Modellvorstellungen der klassischen Physik in wesentlichen Punkten.

THEMA & GESELLSCHAFT

Das Zeitalter der Moderne

Neben der **modernen Physik** spricht man auch von **Moderner Kunst**. Dieser Ausdruck wird in der Musik und der bildnerischen Kunst für Stilrichtungen verwendet, die sich von der klassischen Kunst, hier vor allem von der Romantik, unterscheiden wollen. **Moderne Kunst** ist der übliche Begriff für die avantgardistische Kunst des 20. Jahrhunderts.

5.2 Bewegte Bezugssysteme (moving reference systems)

MERK & WÜRDIG

Der Begriff „inert“ kommt aus dem Latein. Er bedeutet träge.

In **Inertialsystemen** gilt das **Trägheitsgesetz**: Ein Körper verharrt in Ruhe oder geradlinig-gleichförmiger Bewegung, solange keine äußere Kraft auf ihn einwirkt.

5.2.1 Inertialsysteme (inertial frames of reference)

Ein **Inertialsystem** ist ein Bezugssystem, in dem sich kräftefreie Körper geradlinig und gleichförmig bewegen. Verschiedene Inertialsysteme bewegen sich zueinander **geradlinig** und **gleichförmig**. Sich drehende oder anders beschleunigte Bezugssysteme sind keine Inertialsysteme.

THEMA & GESELLSCHAFT

Bewegt sich die Erde oder steht sie still?

Vor etwa 400 Jahren begriff Galileo Galilei, dass er mit Experimenten auf der Erdoberfläche nicht überprüfen konnte, ob sich die Erde bewegt oder ob sie stillsteht. Galilei begründete dies so:

„Schließt Euch in Gesellschaft eines Freundes in einen möglichst großen Raum unter dem Deck eines großen Schiffes ein. Verschafft Euch dort Mücken, Schmetterlinge und ähnliches fliegendes Getier; sorgt auch für ein Gefäß mit Wasser und kleinen Fischen darin [...].

Beobachtet nun sorgfältig, solange das Schiff stille steht, wie die fliegenden Tierchen mit der nämlichen Geschwindigkeit nach allen Seiten des Zimmers fliegen. Man wird sehen, wie die Fische ohne irgendwelchen Unterschied nach allen Richtungen schwimmen; [...]. Nun lasst das Schiff mit jeder beliebigen Geschwindigkeit sich bewegen: Ihr werdet – wenn nur die Bewegung gleichförmig ist und nicht hier- und dorthin schwankend – bei allen genannten Erscheinungen nicht die geringste Veränderung eintreten sehen.“

Die Bewegung der Goldfische im Goldfischglas gibt uns – so Galilei – keine Hinweise darauf, ob und wie schnell sich das Schiff bewegt. Um die Schiffsbewegung zu sehen, muss man hinausblicken und das Wasser und den Hafen beobachten. Genauso muss man den Sternenhimmel betrachten, um die Erdbewegung zu sehen. Mit anderen Worten: Man muss ein **zweites Bezugssystem** zur Hilfe nehmen.

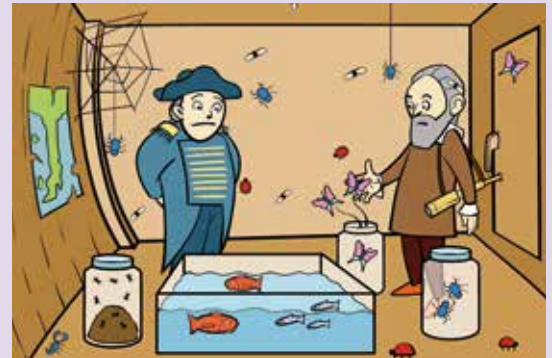


Abb. 102.1 „... über den Rand des Goldfischglases hinausblicken“

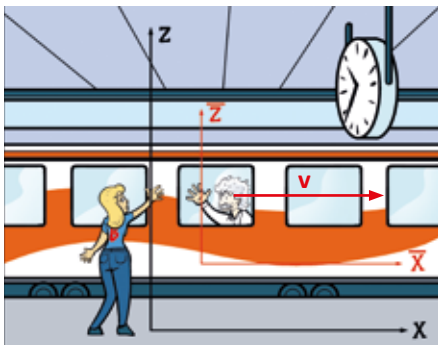


Abb. 102.2 Ein Inertialsystem: Der Zug gleitet mit konstanter Geschwindigkeit v durch den Bahnhof. Das Inertialsystem ist allerdings nicht perfekt, da die Erddrehung außer Acht gelassen wird.

Die bewegten **Goldfische** im Schiff tragen die **Geschwindigkeit des Schiffes** in sich und haben **zusätzlich** noch **ihre eigene Geschwindigkeit**. Allerdings gilt: Nur relativ zu einem äußeren Bezugssystem, beispielsweise vom Hafen aus, könnte ein Beobachter beide Bewegungen wahrnehmen!

Darf man Geschwindigkeiten einfach addieren?

In der **klassischen Alltagsphysik** lassen sich Geschwindigkeiten einfach addieren (Abb. 102.3). Zur Zeit Galileis konnte man sehr hohe Geschwindigkeiten wie die Lichtgeschwindigkeit noch nicht messen. Ein Lichtsignal aus einer schnell fliegenden Rakete sollte bei einfacher Geschwindigkeitsaddition **Überlichtgeschwindigkeit** erreichen. Im Verlauf des 19. Jahrhunderts wies man experimentell mehrfach nach, dass so hohe Geschwindigkeiten nicht existieren. 1905 beschäftigte sich Einstein mit dem Thema. Seine Arbeit, die **Spezielle Relativitätstheorie (SRT)**, kann dieses Problem lösen.

Klassische Physik



Abb. 102.3 **Klassisches Geschwindigkeitsadditionstheorem**: Ein Fußball fliegt im fahrenden Zug in Fahrtrichtung. Die Geschwindigkeit des Balls kann vom Bahnsteig aus als Summe der Zuggeschwindigkeit und der Geschwindigkeit des Balls beobachtet werden: $\vec{v}_{\text{Beobachter}} = \vec{v}_{\text{Ball}} + \vec{v}_{\text{Zug}}$

Moderne Physik

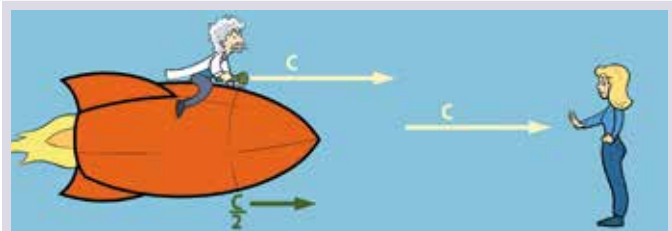


Abb. 102.4 **Relativistisches Geschwindigkeitsadditionstheorem**: Schickt man von einer Rakete, die mit $v = \frac{c}{2}$ fliegt, ein Lichtsignal ins All, dann gilt: Jeder Beobachter außerhalb der Rakete misst das Lichtsignal mit Lichtgeschwindigkeit c . Geschwindigkeiten können nicht einfach addiert werden.

5.2.2 Lichtgeschwindigkeit und die Äthertheorie (light speed and aether theories)

Im Jahr 1881 begannen Albert Michelson und Edward W. Morley (1838 – 1923), die Geschwindigkeit des Lichts relativ zur Erdbewegung zu messen. Nach dem **klassischen Additionstheorem** für Geschwindigkeiten vermuteten sie: Relativ zum ruhenden Bezugssystem, dem Äther (**Abb. 103.1**), sollte die Lichtgeschwindigkeit von der Richtung der Erdbewegung abhängig sein (im Winter: $c + v$, im Sommer: $c - v$).

Nach klassischer Auffassung brauchen auch elektromagnetische Wellen wie Licht ein Trägermedium. Dieses wurde **Äther** (*aether*) genannt. Um das Äthermodell auch im Experiment zu überprüfen, wurden Messungen der Lichtgeschwindigkeit angestellt. Michelson erkannte, dass einfache Laufzeitmessungen zu ungenau wären. Das berühmte Experiment, das er mit dem amerikanischen Chemiker Morley durchführte, beruhte auf seiner Entwicklung des **Interferometers**. High-Tech-Interferometer sind auch aktuell bei der Erforschung von Gravitationswellen im Einsatz (**Seite 121**).

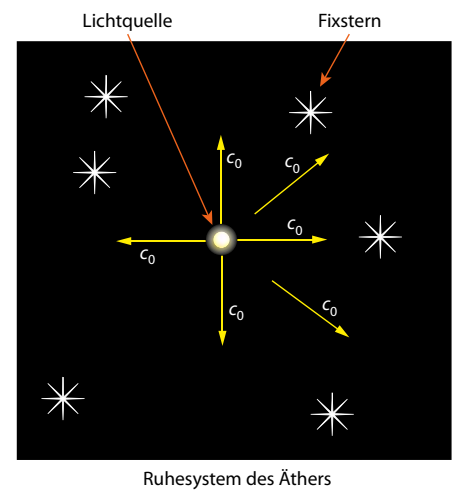


Abb. 103.1 Äthermodell

EXPERIMENT 5.1

Das Interferometer von Michelson und Morley

Das Interferometer beruht auf folgendem Prinzip: Ein halbdurchlässiger Spiegel HS teilt einen Lichtstrahl in zwei Strahlen auf:

- Der erste Strahl durchquert den halbdurchlässigen Spiegel. Dann wird er nach einer bestimmten Strecke l_1 am Spiegel S_1 und danach am halbdurchlässigen Spiegel in Richtung Schirm S reflektiert.
- Der zweite Strahl wird nach der Strecke l_2 in Richtung Schirm reflektiert. Die beiden Strahlen interferieren.

Das **Interferenzmuster** lässt sich auf dem Schirm beobachten. Es ist von der Länge der Wegstrecken und – gemäß Michelsons Annahme – von der Geschwindigkeit der Lichtquelle relativ zum „Ätherwind“ abhängig. Dreht man das Michelson-Interferometer, dann müsste sich eigentlich das Interferenzmuster ändern. Dies ist aber nicht der Fall. Das **Ergebnis des Experiments**: Egal, in welche Richtung das Interferometer ausgerichtet ist – das Interferenzmuster ändert sich nicht.

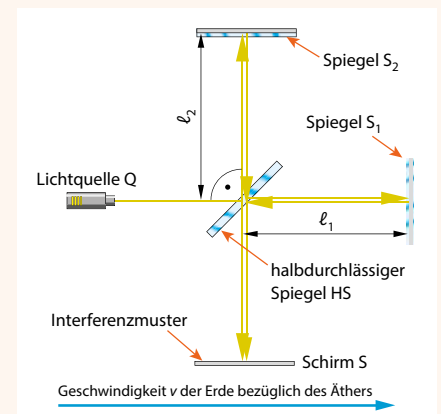


Abb. 103.2 Interferometer

Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Die **Lichtgeschwindigkeit im Vakuum** erweist sich als **vollkommen unabhängig** von der **Geschwindigkeit der Lichtquelle** oder **des Empfängers**. Die **Konstanz** der Lichtgeschwindigkeit wurde seither in vielen Experimenten bestätigt.

Festlegung der Vakuumlichtgeschwindigkeit

Die **Vakuumlichtgeschwindigkeit** c_0 wurde zur **Naturkonstanten** erklärt und wie folgt festgelegt: $c = 2,99\,792\,458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Im Jahr 1983 wurde die SI-Einheit **Meter** abhängig von der Sekunde neu definiert: als Weg, den das Licht in einem bestimmten Bruchteil einer Sekunde zurücklegt (**Abb. 103.4**).

Das klassische Additionstheorem für Geschwindigkeiten

Das klassische Additionstheorem für Geschwindigkeiten wird so angeschrieben:

$$u = \bar{u} + v$$

\bar{u} ... Objekt-Geschwindigkeit aus Sicht eines Beobachters im bewegten Bezugssystem

v ... Geschwindigkeit des bewegten Bezugssystems

u ... Geschwindigkeit des Objekts aus Sicht des ruhenden Beobachters

Es ist in seiner Gültigkeit zu hinterfragen. Die Begründung: Setzt man für v die Lichtgeschwindigkeit ein, ergibt sich als Summe eine höhere Geschwindigkeit als Licht. Das steht im Widerspruch zum Experiment. Und was ist mit dem **Lichtäther**? Ein Ausbreitungsmedium für Licht, wie es der Äther sein soll, erweist sich als unnötig.



Abb. 103.3 Albert Michelson war ein Pionier auf dem Gebiet der Interferometrie.



Abb. 103.4 SI-Grundenheiten

5.2.3 Synchronisation und Gleichzeitigkeit (synchronization and simultaneity)

“Absolute, true and mathematical time, of itself, and from its own nature, flows equably without relation to anything external ...”

ISAAC NEWTON (1643 – 1727)

MERK & WÜRDIG

Was bedeutet Gleichzeitigkeit?

In einem **Bezugssystem** sind **zwei Ereignisse** an **verschiedenen Orten** gleichzeitig, wenn sie von einer **Lichtquelle**, die in der Mitte zwischen den Orten der Ereignisse liegt, durch ein **Lichtsignal** erweckt werden könnten. Die von zwei solchen Ereignissen ausgesendeten Lichtsignale erreichen den Beobachter in der Mitte zwischen den Ereignissen zur gleichen Zeit.



Abb. 104.1 Uhren-Synchronisation: Ein Lichtblitz wird in der Mitte zwischen zwei Uhren abgegeben. Der Lichtblitz setzt den Lauf beider Uhren gleichzeitig in Gang.

Die Widersprüche im Zusammenhang mit den Experimenten von Michelson und Morley waren explosiv: Sie führten zu Beginn des 20. Jahrhunderts zu einem der größten Umdenkprozesse in der Physik. Hier kommt nun Albert Einstein (Seite 105) ins Spiel. Er dachte die Begriffe Raum und Zeit neu.

Wenn Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftler von **Raum (space)** und **Zeit (time)** sprechen, dann stellen sie sich die Frage, wie man diese grundlegenden Größen messen kann. Wie kann man einem Ereignis einen bestimmten Ort und eine bestimmte Zeit zuordnen? Dazu stellte sich Albert Einstein im Idealfall ein **vollkommenes Bezugssystem** vor (Abb. 104.2). Dieses besteht aus

- einem **dreidimensionalen Maßstabgitter** und
- **synchronen Uhren**, die an jedem **Gitterpunkt** positioniert sind.

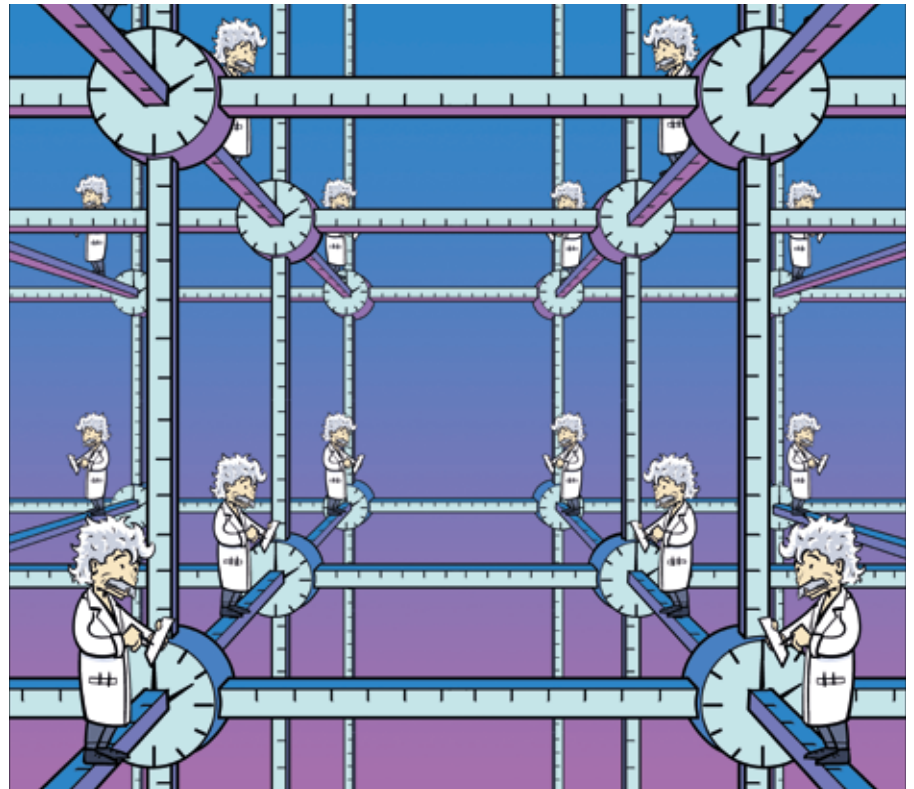


Abb. 104.2 Ein ideales Bezugssystem: In einem Maßstabgitter sind an jedem Gitterpunkt synchrone Uhren positioniert, an denen direkt an Ort und Stelle der Vorgang gemessen wird. Damit werden Laufzeitfehler ausgeschlossen.

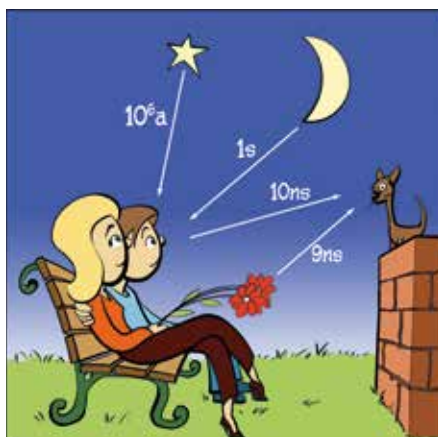


Abb. 104.3 Blicken wir in den Nachthimmel, dann schauen wir in die Vergangenheit. Die Lichteindrücke, die gleichzeitig ins Auge gelangen, stammen von verschiedenen Ereignissen. Diese haben aber nicht zwingend gleichzeitig stattgefunden.

Ein ideales Bezugssystem

Mehrere Vorkehrungen sind wichtig, um Messfehler zu vermeiden. Folgendes muss beachtet werden:

- **Beobachtung vor Ort:** Beim Messen von einer Position aus passieren durch Laufzeitdifferenzen Fehler (Abb. 104.2). Um das zu verhindern, registriert der Beobachter die Uhrzeit eines Ereignisses direkt am Ort des Geschehens. Bei der Beobachtung astronomischer Objekte im All ist man sich immer bewusst, dass man in die Vergangenheit blickt.
- **Maßstabsvergleich:** Nur zwei **zueinander ruhende Maßstäbe** am gleichen Ort können verglichen werden.
- **Uhrenvergleich:** Die Uhren müssen synchron laufen (Abb. 104.1).

Das hier beschriebene ideale Bezugssystem mit den **aufwendigen Messvorschriften** scheint übertrieben. In dieser Form ist es schwer anwendbar. Aber für die **Satellitennavigation (GPS)** ist eine möglichst präzise Zeitmessung Voraussetzung. Dazu müssen die verwendeten Atomuhren weltweit äußerst genau synchronisiert werden.

ERGÄNZUNG & AUSBLICK

Eine Ikone der Physik: Albert Einstein

- Nach schulischen Problemen, die man auf den Umzug seiner Familie nach Italien zurückführen kann, studierte Einstein an der **Technischen Hochschule Zürich**.
- **1902** wurde er technischer Beamter am Patentamt **Bern**.
- **1905** gelangen ihm wichtige Veröffentlichungen in den „Annalen der Physik“ zur **Quantentheorie** und zur **Relativitätstheorie**.
- **1909** erhielt er eine Außerordentliche Professur für theoretische Physik an der Universität Zürich. Danach folgten Universitätsstellen in Prag und Zürich.
- **1914** folgte der Ruf an die Preußische Akademie der Wissenschaften in **Berlin**. Er konnte sich nun ausschließlich seiner **Forschung** widmen.
- **1915** formulierte er die **Allgemeine Relativitätstheorie**, die 1919 bei einer Sonnenfinsternis überprüft werden konnte. Diese erfolgreiche Überprüfung machte Einstein berühmt.
- Ab **1920** wurde er aufgrund seiner jüdischen Herkunft in Deutschland angefeindet.
- **1921** erhielt Einstein den **Nobelpreis für Physik**.

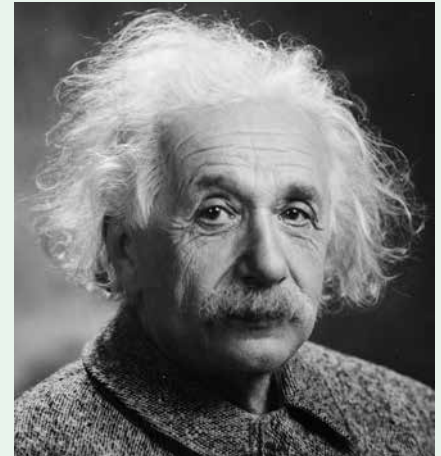


Abb. 105.1 Albert Einstein (1879, Ulm – 1955, Princeton, USA). Ein berühmtes Zitat Einsteins besagt: „Zeit ist, was eine Uhr misst.“

Nach der Machtübernahme der NSDAP verließ Einstein Deutschland. Er erhielt in den USA eine Anstellung am *Institute for Advanced Studies* in **Princeton**. Trotz seiner pazifistischen Einstellung unterzeichnete er 1939 eine Aufforderung an den amerikanischen Präsidenten, den Bau einer Atombombe voranzutreiben. 1945, nach dem Abwurf der Atombomben über Japan, engagierte sich Einstein für die **friedliche Nutzung der Atomenergie**. Er war nicht nur wissenschaftlich, sondern auch kulturell und politisch interessiert. Dies, zusammen mit seiner schrulligen Persönlichkeit, ließ ihn zur Ikone der Physik werden.

ÜBUNGEN

Bei der Bearbeitung der folgenden Übungen testest du deine Kenntnisse zu Bezugssystemen und naturwissenschaftlichen Vorstellungen.

Ü 5.1

Inertialsystem-Quiz. Beantworte die folgenden Fragen zum Thema Inertialsystem.

- a) Benenne ein Experiment, das das klassische Additionstheorem für Geschwindigkeiten in Frage stellt: _____
- b) Kreuze die richtige Definition an: Der Äther ist ...
- | | |
|---|--------------------------|
| A eine chemische Verbindung. | <input type="checkbox"/> |
| B ein Mädchenname. | <input type="checkbox"/> |
| C ein hypothetisches Bezugssystem für Schallwellen. | <input type="checkbox"/> |
| D ein durchsichtiges Medium, in dem sich Licht ausbreiten kann. | <input type="checkbox"/> |
- c) Bewerte die Aussagen und kreuze die richtigen Sätze an.
- | | |
|--|--------------------------|
| A Gleichförmig bewegte Bezugssysteme haben eine absolute Geschwindigkeit, die konstant ist. | <input type="checkbox"/> |
| B Den Bewegungszustand von Inertialsystemen kann man nur relativ zu anderen Inertialsystemen angeben. | <input type="checkbox"/> |
| C Die Erde – und damit auch der Physiksaal – ist genau genommen kein Inertialsystem, weil die Erde rotiert. | <input type="checkbox"/> |
| D Die Spezielle Relativitätstheorie beschäftigt sich mit Bewegungen in zueinander bewegten Inertialsystemen. | <input type="checkbox"/> |

Ü 5.2

Argumentiere. Anna-Carina sagt: „Wenn schnell fliegende Raketen Licht ausstrahlen, muss dieses Licht eine höhere Geschwindigkeit haben. Das sagt einem der Hausverstand!“

- Berthold meint: „Ich glaube, dass man die Lichtgeschwindigkeit deshalb nicht überschreiten kann, da man es in der Praxis immer mit Luft, Glas oder Wasser zu tun hat. Dort ist die Lichtgeschwindigkeit ohnehin langsamer.“
- Lydia ergänzt: „In schnell fließendem Wasser sollte die Lichtgeschwindigkeit größer sein als im stehenden Wasser.“

Finde Argumente, die Anna-Carina, Lydias und Bertholds Aussagen bekräftigen oder widersprechen.

MERK & WÜRDIG

Lichtgeschwindigkeit

- Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist vollkommen unabhängig von der Geschwindigkeit der Lichtquelle oder des Empfängers.
- Die **Vakuumllichtgeschwindigkeit** c_0 wurde zur Naturkonstanten erklärt und festgelegt.
- $c = 2,99\ 792\ 458 \cdot 10^8\ \text{m/s}$

Äther

Ein Ausbreitungsmedium für Licht – der hypothetische **Äther** – erweist sich als unnötig.