

# Die faszinierende Welt der Physik

## Leibnizkolleg Physikkurs



Dr. Thorsten Nagel

2016/2017



# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Trimester 1 und 2</b>	<b>15</b>
<b>0</b>	<b>Allgemeines</b>	<b>17</b>
0.1	Technische Details . . . . .	17
0.2	Themenübersicht . . . . .	18
0.3	Literatur . . . . .	19
0.4	Referate . . . . .	20
0.4.1	Themenreihe „Berühmte Naturwissenschaftler“ . . . . .	20
0.4.2	Themenreihe „Alltagsphänomene“ . . . . .	20
0.5	Trimesterarbeiten . . . . .	21
<b>1</b>	<b>Kernspaltung und Kernfusion</b>	<b>23</b>
1.1	Literatur zur Vertiefung . . . . .	23
1.2	Geschichtliches . . . . .	23
1.3	Aufbau des Atoms . . . . .	25
1.3.1	Ergänzung zur Bindungsenergie . . . . .	28
1.4	Kernspaltung . . . . .	29
1.5	Kernfusion . . . . .	30
1.6	$\alpha$ -Zerfall . . . . .	32
1.7	$\beta$ -Zerfall . . . . .	33
1.8	$\gamma$ -Zerfall . . . . .	34
<b>2</b>	<b>Das Licht und sein Spektrum</b>	<b>37</b>
2.1	Literatur zur Vertiefung . . . . .	37
2.2	Allgemeines . . . . .	38
2.3	Der Wellenlängenbereich des Lichts . . . . .	39
2.4	Woher stammt das Licht in unserem Alltag ? . . . . .	41
2.4.1	Einschub: Das Schalenmodell des Atoms . . . . .	43
2.5	Das Spektrum . . . . .	44
2.5.1	Das Kontinuumsspektrum . . . . .	45
2.5.2	Das Linienspektrum . . . . .	46
2.6	Dualität des Lichts . . . . .	47
2.6.1	Der Photoeffekt (1888 entdeckt) . . . . .	48
2.6.2	Interferenz . . . . .	49
2.7	Maxwell-Gleichungen . . . . .	50

<b>3</b>	<b>Einführung in die Quantenphysik</b>	<b>51</b>
3.1	Allgemeines . . . . .	51
3.2	Heisenberg'sche Unschärferelation . . . . .	52
3.3	Doppelspalt-Experiment . . . . .	52
3.4	Schrödinger's Katze . . . . .	54
3.5	Tunneleffekt . . . . .	55
<b>4</b>	<b>Teilchenzoo</b>	<b>57</b>
4.1	Literatur zur Vertiefung . . . . .	57
4.2	Allgemeines . . . . .	58
4.3	Leptonen . . . . .	58
4.4	Hadronen . . . . .	59
4.5	Eigenschaften . . . . .	60
4.6	Jenseits des Standardmodells . . . . .	62
4.7	Offene Fragen des Standardmodells . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Fundamentalkräfte</b>	<b>65</b>
5.1	Allgemeines . . . . .	66
5.2	Gravitation . . . . .	67
5.3	Elektro-Magnetische Kraft . . . . .	68
5.4	Schwache Kraft . . . . .	69
5.5	Starke Kraft . . . . .	70
5.6	Vereinheitlichung der Kräfte . . . . .	71
5.6.1	Die Anfänge des Urknallmodells . . . . .	72
5.6.2	Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung . . . . .	76
5.6.3	Grand Unified Theories (GUTs) . . . . .	76
5.6.4	Theories Of Everything (TOE) . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Einsteins Relativitätstheorie</b>	<b>77</b>
6.1	Literatur zur Vertiefung . . . . .	77
6.2	Allgemeines . . . . .	78
6.3	Postulate der Speziellen Relativitätstheorie . . . . .	78
6.4	Das Myonenschauer-Experiment . . . . .	79
6.5	Zeitdilatation . . . . .	80
6.5.1	Flug mit Uhren . . . . .	80
6.5.2	Das Zwillingsparadoxon . . . . .	80
6.6	Formelsammlung Spezielle Relativitätstheorie . . . . .	82
6.7	Die allgemeine Relativitätstheorie . . . . .	83
6.7.1	Gleichheit von schwerer und träger Masse . . . . .	83
6.7.2	Die Drehung des Merkur-Perihels . . . . .	84
6.7.3	Die Krümmung der Raumzeit . . . . .	85
6.8	Visualisierung relativistischer Effekte . . . . .	86
<b>7</b>	<b>Supraleitung</b>	<b>89</b>
7.1	Literatur zur Vertiefung . . . . .	89
7.2	Die Entdeckung . . . . .	90
7.3	Ein paar Fakten . . . . .	91

7.4	Supraleiter 1. Art . . . . .	93
7.5	Supraleiter 2. Art . . . . .	94
7.6	Hochtemperatur-Supraleiter . . . . .	95
7.7	Der supraleitende Zustand: BCS-Theorie . . . . .	96
7.8	Fermionen und Bosonen . . . . .	98
7.9	Anwendungsgebiete für Supraleiter . . . . .	98
7.9.1	Anwendung: SQUID . . . . .	100
<b>8</b>	<b>Bose-Einstein-Kondensation</b>	<b>101</b>
8.1	Die Anfänge . . . . .	101
8.2	Die Erzeugung eines BEC . . . . .	102
8.3	Laserkühlung . . . . .	103
8.4	Verdampfungskühlung . . . . .	104
8.5	Das Kondensat . . . . .	105
8.6	Was kann man mit einem BEC anfangen ? . . . . .	105
<b>II</b>	<b>Trimester 3</b>	<b>107</b>
<b>9</b>	<b>Einführung</b>	<b>109</b>
9.1	Ort des Geschehens . . . . .	110
9.2	Auswertung der Experimente . . . . .	112
<b>10</b>	<b>Das Maxwellrad</b>	<b>113</b>
10.1	Motivation . . . . .	113
10.2	Durchführung . . . . .	117
10.2.1	Aufgaben . . . . .	117
<b>11</b>	<b>Die Lorentzkraft</b>	<b>119</b>
11.1	Historie . . . . .	119
11.2	Motivation . . . . .	121
11.3	Die Experimente . . . . .	122
11.3.1	Elektronenstrahl im Magnetfeld . . . . .	122
11.3.2	Naturkonstanten . . . . .	124
<b>12</b>	<b>Das Millikan-Experiment</b>	<b>125</b>
12.1	Motivation . . . . .	125
12.2	Theoretischer Hintergrund . . . . .	125
12.3	Durchführung . . . . .	128
12.4	Auswertung . . . . .	128
<b>13</b>	<b>Radioaktivität</b>	<b>129</b>
13.1	Aufbau des Atoms . . . . .	129
13.2	Radioaktive Zerfälle . . . . .	130
13.2.1	$\alpha$ -Zerfall . . . . .	130
13.2.2	$\beta$ -Zerfall . . . . .	131
13.2.3	$\gamma$ -Zerfall . . . . .	132
13.2.4	Zerfallsgesetz . . . . .	133

13.3	Quellen radioaktiver Strahlung . . . . .	134
13.4	Wechselwirkung mit Materie . . . . .	135
13.5	Schutz vor radioaktiver Strahlung . . . . .	138
13.6	Geiger-Müller-Zählrohr . . . . .	139
13.7	Experiment und Auswertung . . . . .	141
<b>14</b>	<b>Bau einer Nebelkammer</b>	<b>143</b>
14.1	Motivation . . . . .	143
14.2	Zusammenbau . . . . .	144
<b>15</b>	<b>Der elektrische Telegraph</b>	<b>147</b>
15.1	Motivation . . . . .	147
15.2	Das Morsealphabet . . . . .	147
15.3	Bau des Telegraphen . . . . .	148
<b>16</b>	<b>Das Detektorradio</b>	<b>151</b>
16.1	Motivation . . . . .	151
16.2	Filter . . . . .	152
16.3	Demodulator . . . . .	153
16.4	Der Zusammenbau . . . . .	154
<b>17</b>	<b>Photometrie und Spektroskopie</b>	<b>161</b>
17.1	Sterne und ihre Spektren . . . . .	161
17.2	Veränderliche Sterne . . . . .	164
17.3	Instrumentierung . . . . .	167
17.3.1	Teleskop . . . . .	167
17.3.2	Spektrograph . . . . .	168
17.3.3	CCD Kamera . . . . .	168
17.4	Spektralanalyse . . . . .	170
17.5	Relative Photometrie . . . . .	174
17.5.1	Tausend Bilder und eine Lichtkurve . . . . .	174
17.5.2	Einlesen eines FITS-files . . . . .	175
17.5.3	Helligkeitsmessung . . . . .	175
17.5.4	Bestimmung der Lage des Objekts . . . . .	176
17.5.5	Bestimmung des Aufnahmezeitpunktes . . . . .	177
17.5.6	Bestimmung der Pulsationsperiode . . . . .	178
<b>18</b>	<b>Licht und Farben – Spektroskopie</b>	<b>179</b>
18.1	Motivation . . . . .	179
18.2	Einfach Fragen – einfache Antworten ? . . . . .	180
18.2.1	Wieso ist der Himmel blau ? . . . . .	180
18.2.2	Was passiert, wenn die Sonne sehr tief steht (Abendrot, Abb. 18.2) ? . . . . .	180
18.2.3	Und wie sieht der Himmel auf dem Mond aus ? . . . . .	180
18.3	Wahrnehmung von Farben . . . . .	182
18.4	Das Spektroskop . . . . .	183
18.4.1	Entstehung eines Spektrums durch Beugung am Gitter . . . . .	185
18.5	Sternspektren . . . . .	186
18.5.1	Spektralklassen . . . . .	186

18.5.2 Spektralanalyse . . . . .	188
<b>A Spektroskopie</b>	<b>193</b>
A.1 Wellenlängenkalibration . . . . .	193
A.2 HgNe-Kalibrationsspektrum . . . . .	194
A.3 Starke Linien in Sternspektren. . . . .	195
A.4 Das Spiegelteleskop des AIT . . . . .	199
A.5 Selbstbau-Spektroskop . . . . .	200
<b>B Einführung in IDL</b>	<b>201</b>
B.1 Ein paar Worte zu Linux . . . . .	201
B.2 Zuweisungen . . . . .	202
B.3 Felder . . . . .	202
B.4 Schleifen-Konstrukte . . . . .	203
B.5 IF-Statements . . . . .	204
B.6 Einfache Plot-Routinen . . . . .	204
B.7 Funktionen . . . . .	206
B.8 Für Fortgeschrittene... . . . .	208



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Schema des Rutherford Streuexperimentes. . . . .	24
1.2	Schematische Darstellung des Atomaufbaus. . . . .	26
1.3	Tröpfchenmodell . . . . .	27
1.4	Abhängigkeit der Bindungsenergie pro Nukleon . . . . .	27
1.5	Schematische Darstellung einer Kernspaltung. . . . .	29
1.6	Schematische Darstellung des Tunneleffekts. . . . .	30
1.7	Schematische Darstellung einer Kernfusion. . . . .	31
1.8	Schematische Darstellung eines Tokamak-Fusionsreaktors. . . . .	31
1.9	Schematische Darstellung des $\alpha$ -Zerfalls. . . . .	32
1.10	Schematische Darstellung des $\beta$ -Zerfalls. . . . .	33
1.11	Schematische Darstellung des $\gamma$ -Zerfalls. . . . .	34
1.12	Zerfallsreihe des Thorium. . . . .	35
1.13	Sir Joseph John Thomson; Lord Ernest Rutherford; Otto Hahn und Lise Meitner; Fritz Strassmann . . . . .	36
2.1	Begriffe zur Beschreibung einer Welle. . . . .	38
2.2	Das elektromagnetische Spektrum. . . . .	39
2.3	Durchlässigkeit der Erdatmosphäre für elektromagnetische Wellen. . . . .	40
2.4	Der innere Aufbau der Sonne. . . . .	41
2.5	Schematische Darstellung einer Glühbirne (Quelle: <a href="http://www.gmw24.com">www.gmw24.com</a> ). . . . .	42
2.6	Schematische Darstellung einer Leuchtstoffröhre (Quelle: <a href="http://elektronikinfo.de">elektronikinfo.de</a> ). . . . .	42
2.7	Elektronenübergänge im Schalenmodell des Atoms. . . . .	43
2.8	Kontinuumsspektren für verschiedene Temperaturen. . . . .	45
2.9	Das Linienspektrum unserer Sonne (Quelle: Weber et al. 1998). . . . .	46
2.10	Schematische Darstellung eines Experiments zum Photoeffekt. . . . .	48
2.11	Schematische Darstellung der Interferenz zweier Wellen. . . . .	49
3.1	Doppelspaltexperiment mit Wellen (links) und Teilchen (rechts). Beides mal entsteht ein Interferenzmuster. (Quelle: <a href="http://blacklightpower.com">blacklightpower.com</a> ) . . . . .	53
3.2	Gedankenexperiment Schrödinger's Katze. (Quelle: <a href="http://www.physiologus.de">www.physiologus.de</a> ) . . . . .	54
3.3	Schematische Darstellung des Tunneleffekts. (Quelle: Kyoto University) . . . . .	55
4.1	Zusammenfassender Überblick der Unterteilung des Teilchenzoos . . . . .	61
4.2	Schematische Darstellung der Erzeugung eines Pentaquarks. . . . .	62
4.3	Verteilung der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung. . . . .	64
5.1	Elektromagnetische Kraft; Abstoßung zweier Elektronen. . . . .	68
5.2	Schwache Kraft; $\beta$ -Zerfall eines Neutrons . . . . .	69

5.3	Starke Kraft; Anziehung zweier Quarks durch Gluonenaustausch. . . . .	70
5.4	Vereinheitlichung der vier Fundamentalkräfte. . . . .	71
5.5	Albert Einstein und Willem de Sitter . . . . .	74
5.6	links: Albert Einstein und Georges LeMaître; rechts: Alexander Friedman . . . . .	74
5.7	Vesto Slipher . . . . .	75
5.8	links: Edwin Hubble; rechts: Die von Hubble und LeMaître entdeckte Beziehung zwischen Fluchtgeschwindigkeit (Rotverschiebung) und Entfernung . . . . .	75
6.1	Raum-Zeit-Diagramm für Bruder (rot) und Schwester (blau). . . . .	80
6.2	Gleichzeitigkeit für Bruder und Schwester ist nur im schraffierten Bereich möglich. . . . .	81
6.3	Träge und schwere Masse sind identisch (Quelle: Pearson Education) . . . . .	83
6.4	Schematische Darstellung der Periheldrehung. . . . .	84
6.5	Schematische Darstellung der Raumkrümmung. . . . .	85
6.6	Visualisierung relativistischer Effekte. . . . .	86
6.7	Visualisierung zum Dopplereffekt. Oben ein ruhendes Gitter, unten links bewegt sich dasselbe Gitter mit $0.9c$ auf den Beobachter zu, rechts mit $0.9c$ vom Beobachter weg. . . . .	87
7.1	H. K. Onnes und der von ihm beobachtete Sprung des elektrischen Widerstands beim Quecksilber (Quelle: <a href="http://www-solidstate.physik.uni-bremen.de">www-solidstate.physik.uni-bremen.de</a> ). . . . .	89
7.2	Supraleitung bei den Elementen des Periodensystems. . . . .	92
7.3	Schematische Darstellung des Meissner-Ochsenfeld-Effekts. Sinkt bei einem Supraleiter die Temperatur unter den kritischen Wert $T_c$ , wird ein äußeres Magnetfeld aus dem Inneren des Supraleiters verdrängt. (Quelle: <a href="http://www.scienceblogs.de">www.scienceblogs.de</a> ) . . . . .	93
7.4	Flussschläuche in einem Supraleiter 2. Art. (Quelle: <a href="http://www.scienceblogs.de">www.scienceblogs.de</a> ) . . . . .	94
7.5	Cooperpaarbildung in einem Supraleiter. (Quelle: Bernhard Keimer MPI for Solid State Research) . . . . .	97
7.6	Supraleitendes Kabel. Ein Beispiel für den operationellen Einsatz der Hochtemperatur-Supraleitung: In einer Stromverteilungsanlage von Kopenhagen, die etwa 50 000 Haushalte versorgt, hat die Firma NKT Cables supraleitende BSCCO-Kabel verlegt. (Quelle: <a href="http://ec.europa.eu">ec.europa.eu</a> ) . . . . .	99
7.7	Supraleitender Magnet. Der weltweit größte Magnet für bildgebende Verfahren in der Hirnforschung ist der 9,4 Tesla-NMR-PET (Mai 2008). Der rund vier Meter lange und 57 t schwere supraleitende Magnet kam per Schwertransport aus Großbritannien (Oxford) nach Jülich, wurde im Laufe des Tages per Kran abgeladen und in das eigens für ihn errichtete neue Gebäude gebracht. Dort sorgen in einem $150\text{ m}^2$ großen Raum 870 t Stahl für die Abschirmung des Magnetfeldes nach außen. (Quelle: <a href="http://www.fz-juelich.de">www.fz-juelich.de</a> ) . . . . .	99
7.8	Schematische Darstellung eines SQUID (Quelle: <a href="http://wikimedia commons">wikimedia commons</a> ) . . . . .	100
8.1	Schematische Darstellung des Übergangs in ein Bose-Einstein-Kondensat (Quelle: <a href="http://www-solidstate.physik.uni-bremen.de">www-solidstate.physik.uni-bremen.de</a> ). . . . .	102
8.2	Prinzip der Laserkühlung (Quelle: <a href="http://www.mpg.de">www.mpg.de</a> ). . . . .	103
8.3	Laborexperiment für ein Bose-Einstein-Kondensat mit $^{87}\text{Ru}$ (Quelle: Institute of Quantum Electronics, Peking Univ.) . . . . .	104
8.4	Ausbildung des Bose-Einstein-Kondensats. (Quelle: <a href="http://www.bec.nist.gov">www.bec.nist.gov</a> ). . . . .	105
9.1	Übersichtsplan Morgenstelle . . . . .	110
9.2	Übersichtsplan Sand . . . . .	111

10.1	Geschwindigkeitsverlauf bei einem Fallschirmsprung. . . . .	115
10.2	Schema des Maxwellrads . . . . .	117
11.1	M. Faraday; J.C. Maxwell, H.A. Lorentz; J.J. Thomson . . . . .	120
11.2	Skizzen zur Lorentzkraft und stromdurchflossenen Spule . . . . .	121
11.3	Aufbau des Experiments . . . . .	122
12.1	links: Schematische Darstellung des Millikanversuchs. Die Öltröpfchen bewegen sich je nach angelegter Spannung $U$ zwischen den beiden Kondensatorplatten nach oben und unten. rechts: Versuchsapparatur. Über die orange Handpumpe werden Öltröpfchen in den mittig zu sehenden Plattenkondensator gebracht und mittels des Mikroskopes beobachtet. Rechts ist die LED Lampe zu erkennen, die für die Beleuchtung für die Dunkelfeldmessmethode sorgt. . . . .	127
13.1	Schematische Darstellung des Aufbaus eines Heliumatoms. . . . .	129
13.2	Schematische Darstellung des $\alpha$ -Zerfalls. . . . .	130
13.3	Schematische Darstellung des $\beta$ -Zerfalls. . . . .	131
13.4	Schematische Darstellung des $\gamma$ -Zerfalls. . . . .	132
13.5	Natürliche und künstliche Strahlungsquellen. (Quelle: wikimedia.org) . . . . .	134
13.6	Wechselwirkung von $\gamma$ -Strahlung mit Materie. (Quelle: zw-jena.de) . . . . .	136
13.7	Internationale Warnzeichen für Radioaktivität . . . . .	138
13.8	Schema eines Geiger-Müller-Zählrohres . . . . .	139
14.1	Trockeneis . . . . .	144
14.2	Materialsammlung für die Nebelkammer . . . . .	145
14.3	Die fertige Nebelkammer . . . . .	146
15.1	Das Morsealphabet. . . . .	148
15.2	Das Material um den Telegraphen zu bauen. . . . .	149
15.3	Der fertige Telegraph, unten der Taster, oben der Empfänger. . . . .	150
16.1	Schematische Funktionsweise eines Detektorradios . . . . .	151
16.2	Schematischer Aufbau des Schwingkreises und Widerstandskurve . . . . .	152
16.3	Schematische Funktionsweise der Diode . . . . .	153
16.4	Prinzip der Amplitudenmodulation . . . . .	153
16.5	Einzelteile, die wir brauchen. . . . .	155
16.6	Das Detektorradio . . . . .	156
16.7	Schaltplan des Detektorradios . . . . .	157
16.8	Bauplan des Detektorradios . . . . .	158
16.9	Übersicht der Senderfrequenzen . . . . .	159
17.1	Hertzsprung-Russell Diagramm mit den Spektralklassen . . . . .	162
17.2	Sternspektren verschiedener Spektralklassen. . . . .	163
17.3	Variable Sterne im Hertzsprung-Russell-Diagramm (Quelle: wikipedia). . . . .	165
17.4	Lichtkurve des pulsierenden Weißen Zwergs GD358. . . . .	166
17.5	Darstellung eines Schmidt-Cassegrain-Spiegelteleskops (oben) und eines Newton-Spiegelteleskops (unten) (Quelle: wikipedia). . . . .	167
17.6	Schematische Darstellung eines Langspaltspektrographen. . . . .	168
17.7	CCD Kamera STL 1001E von SBIG. . . . .	169

18.1	Streuung des Sonnenlichts in der Erdatmosphäre . . . . .	181
18.2	Entstehung des Abendrot . . . . .	181
18.3	Beispiel für additive und subtraktive Farben. . . . .	182
18.4	Selbstbau-Spektroskop nach Alan Schwabacher. . . . .	183
18.5	Geometrie der Beugung am Doppelspalt . . . . .	185
18.6	Hertzprung-Russel Diagramm mit den Spektralklassen . . . . .	187
A.1	Hg/Ne-Kalibrationsspektrum, aufgenommen mit dem 1200er Gitter. . . . .	194
A.2	Der Tübinger 0,8 m Reflektor. . . . .	199
A.3	Bastelanleitung für ein Spektroskop. . . . .	200

# Tabellenverzeichnis

4.1	Übersicht der drei Quarkfamilien . . . . .	60
4.2	Übersicht der drei Leptonenfamilien . . . . .	60
5.1	Übersicht der vier Fundamentalkräfte und ihrer Eigenschaften. . . . .	66
13.1	Halbwertszeiten einiger radioaktiver Isotope . . . . .	133
A.1	Laborwellenlängen der Hg- und Ne-Kalibrationslampen nach Kurucz . . . . .	193



**Teil I**  
**Trimester 1 und 2**



# Kapitel 0

## Allgemeines

### 0.1 Technische Details

- es gibt eine Webseite, die den Kurs begleitet und z.B. das Skript, die Folien, die Referatsthemen etc. enthält:  
<http://astro.uni-tuebingen.de/~nagel/leibniz>
- Kontak per Email: [nagel@astro.uni-tuebingen.de](mailto:nagel@astro.uni-tuebingen.de)  
ansonsten findet man mich hier:  
Astronomisches Institut, Sand 1, Raum A212, Tel.: 07071 29 78612
- Anwesenheitspflicht: immer und pünktlich (Kollegsuhr im Flur !)
- keine Handys, PDAs, Notebooks, Pads etc. im Kurs
- kein Essen im Kurs
- es gibt zu jeder Themeneinheit ein Skript
- Protokolle werden zu zweit angefertigt, insbesondere Fragen, Antworten, Diskussion mit-schreiben, spätestens Freitag an mich schicken, werde sie dann kopiert für alle am Montag mitbringen

## 0.2 Themenübersicht

- Kernfusion und Kernspaltung
- Das Licht und sein Spektrum
- Einführung in die Quantenphysik
- Der Teilchenzoo
- Fundamentale Wechselwirkungen (Kräfte)
- Spezielle und allgemeine Relativitätstheorie
- Supraleitung
- Bose-Einstein-Kondensation BEC
- Besuch Supraleitung-Demoexperiment
- Besuch des Tübinger 0.8m Teleskopes
- Experimente aus dem Anfängerpraktikum (3. Trimester)
- Infoabend: Physik in Studium und Beruf (Beginn 2. Trimester)

## 0.3 Literatur

- Zwei allgemeine Physikbücher:
  - Gerthsen: Physik
  - Tipler: Physik
- Spezielle Bücher:
  - Demtröder
  - Bergmann-Schäfer (nur für Vielleser)
  - Haken-Wolf: Atomphysik
  - Povh: Kern- und Teilchenphysik
  - Buckel: Supraleitung
  - Kuchling: Taschenbuch der Physik
  - Bronstein: Taschenbuch der Mathematik
- Zwei gute Astronomiebücher:
  - Unsöld, Baschek: Der neue Kosmos
  - Karttunen: Astronomie
- Zeitschriften:
  - Spektrum der Wissenschaften
  - Physik in unserer Zeit
  - Sterne und Weltraum
  - Sky and Telescope
  - Bulletin of the Atomic Scientists (politisches Magazin)
  - Science
  - Nature

## 0.4 Referate

Die Referate sind als Kurzreferate gedacht, etwa 12 Minuten lang. Hierbei ist es wichtig, sich auf das Wesentliche zu beschränken, und knapp und präzise zu formulieren. Zu jedem Referat muss ein Handout angefertigt werden. Um die Zeitvorgaben einzuhalten ist es wichtig, das Referat vorher zu üben.

### 0.4.1 Themenreihe „Berühmte Naturwissenschaftler“

- Archimedes
- Galileo Galilei
- Sir Isaac Newton
- Johannes Kepler
- Marie Curie
- Albert Einstein
- Werner Heisenberg
- Erwin Schrödinger
- Julius R. Oppenheimer
- Nikola Tesla

### 0.4.2 Themenreihe „Alltagsphänomene“

- Blitz und Donner
- Ebbe und Flut
- Tsunamis und Monsterwellen
- Kometen und Sternschnuppen
- Radioaktive Strahlung
- Kernkraftwerke
- Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger ?
- Mythos LHC - ist er wirklich so gefährlich ?
- Das Telefon
- Warum fliegen Flugzeuge ?
- Himmelblau, Abendrot, Regenbogen und Polarlicht
- Warum macht ein Prisma weißes Licht bunt ?
- Warum ist es nachts dunkel ? Das Olbersche Paradoxon

## 0.5 Trimesterarbeiten

- Weltbilder – von der Antike bis heute
- Neutrinos – masselose Teilchen ?
- Fusionsreaktoren – Stand der Forschung
- Solarenergie – Energiequelle der Zukunft ?
- Leben und Werk von (zum Beispiel) Julius Robert Oppenheimer
- Der Laser – Prinzip, Funktionsweise, Einsatzgebiete
- Holographie
- Das Michelson-Morley-Experiment
- Der LHC – wieso wir keine Angst haben müssen
- Teleskope vom Radio- bis zum Röntgenbereich
- Sonnenflecken
- Entfernungsbestimmung im All
- Schwarze Löcher
- Sternentwicklung – Die Zukunft der Sonne
- Extrasolare Planeten – Suchmethoden und neueste Erkenntnisse
- Kosmologie – Wo kommt das Universum her
- Ein Versuch aus dem Anfängerpraktikum für Physikstudenten (2. Trimester)
- Photometrie und Spektroskopie mit dem Großteleskop des Astronomischen Instituts (2. Trimester)
- Bestimmung der Pulsationsperiode eines Sterns (beinhaltet einen kleinen Programmiereteil, sehr einfach zu erlernen) (2. Trimester)
- eigene Vorschläge, z.B. aufbauend auf einem Referat



# Kapitel 1

## Kernspaltung und Kernfusion

### 1.1 Literatur zur Vertiefung

- Povh: Teilchen und Kerne
- Fraunfelder: Kernphysik
- Bethge: Kernphysik
- Mayer-Kuckuk: Kernphysik

### 1.2 Geschichtliches

- Thales: Wasser als Urstoff
- Anaximander: apeiron, Urstoff völliger Attributlosigkeit
- Anaximenes: Luft als Urstoff
- Empedokles: 4 stoicheia: Feuer, Wasser, Luft und Erde
- Leukipp und Demokrit: unendlich kleine Teilchen unterschiedlicher Formen, atoma
- Thomson-Atommodell: Masse und positive Ladung sind gleichmäßig im Atom verteilt, darin eingebettet sind die Elektronen (Rosinenkuchenmodell).
- 1908: Rutherford entdeckt den Atomkern: Enges Bündel von  $\alpha$ -Teilchen (Heliumkerne) aus radioaktivem Präparat trifft auf sehr dünne Goldfolie. Die allermeisten  $\alpha$ -Teilchen gehen unabgelenkt hindurch.
  - Kern ist nahezu punktförmig
  - Kerndurchmesser ungefähr 10 000 mal kleiner als Atomdurchmesser

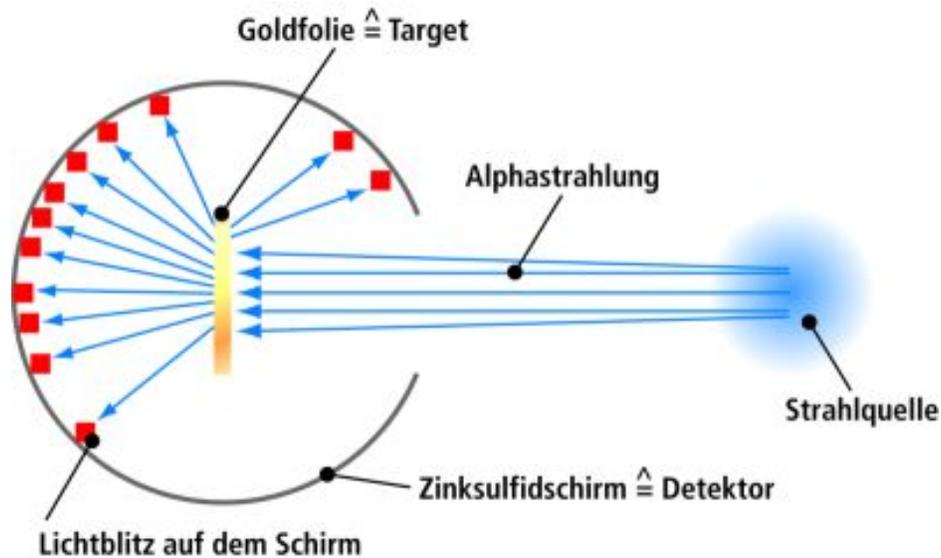


Abbildung 1.1: Schema des Rutherford Streuexperimentes. (Quelle: weltderphysik.de)

- 1920: Kernfusion in Sternen von Eddington postuliert: „Wenn tatsächlich die subatomare Energie in den Sternen frei verwendet wird, um die Energieproduktion zu unterhalten, so scheint das unseren Traum der Erfüllung etwas näher zu bringen, diese latente Energie zum Wohle der Menschheit einzusetzen - oder zu deren Selbstmord.“
- 19.12.1938: Otto Hahn und Fritz Straßmann gelingt zufällig die Kernspaltung, Lise Meitner und Otto Frisch finden die physikalische Erklärung. Durch Neutronen induzierte Kernspaltung von  $^{238}\text{U}$  liefert freie Neutronen → Kettenreaktion möglich
- 16.7.1945, 5:29 Uhr: erster Test einer Spaltungsbombe in Alomogordo, New Mexiko
- 6.8.1945 und 9.8.1945: Hiroshima und Nagasaki
- 1.11.1952: erfolgreicher Test einer Fusionsbombe (Wasserstoffbombe)
- Heutige Kernkraftwerke sind Spaltungsreaktoren. Fusionsreaktoren als Energielieferanten sind noch immer Zukunftsmusik (geplanter Reaktor: ITER).

## 1.3 Aufbau des Atoms

- Streu- und Stoßexperimente geben Auskunft über Struktur der Atome und ihrer Kerne
- Experimente finden in Teilchenbeschleunigern statt (Linearbeschleuniger, Synchrotrons). Dabei werden geladene Teilchen in einem elektrischen Feld beschleunigt und aufeinandergeschossen.
- $e^+e^-$  Kollisionen werden zur Teilchenerzeugung genutzt
- Atom-Hülle besteht aus Elektronen (elektrisch negativ geladen)
- Atom-Kern besteht aus Nukleonen, die durch die starke Kernkraft zusammengehalten werden
- Nukleonen: Protonen (elektrisch positiv geladen) und Neutronen (elektrisch neutral)
- Proton und Neutron bestehen aus jeweils 3 Quarks
- Ein Element ist bestimmt durch die Anzahl der Protonen (Wasserstoff: 1 Proton; Helium: 2 Protonen)
- Isotope eines Elements haben dieselbe Zahl Elektronen und Protonen (Kernladungszahl), sie unterscheiden sich jedoch in der Zahl der Neutronen
- Atome bzw. Elemente (zum Beispiel Sauerstoff) werden meist auf folgende Weise geschrieben:



Hierbei bedeuten

- 8.....Kernladungszahl (Zahl der Protonen, entspricht Zahl der Elektronen)
- 16.....Massenzahl (Summe der Zahl der Protonen und der Zahl der Neutronen)
- Die Masse eines Atomkerns ist kleiner als die Summe der Nukleonenmassen: Massendefekt. Die fehlende Masse steckt in der Bindungsenergie (nach A. Einstein gilt die Masse-Energie-Äquivalenz  $E = mc^2$  mit der Energie  $E$ , Masse  $m$  und Lichtgeschwindigkeit  $c$ ).
- Bindungsenergie, die die Nukleonen beieinander hält, ist bei Eisen am größten. Deshalb ist bei Kernen (Elementen) leichter als Eisen ein Energiegewinn nur durch Kernfusion, bei den schwereren Kernen (Elementen) nur durch Spaltung möglich.

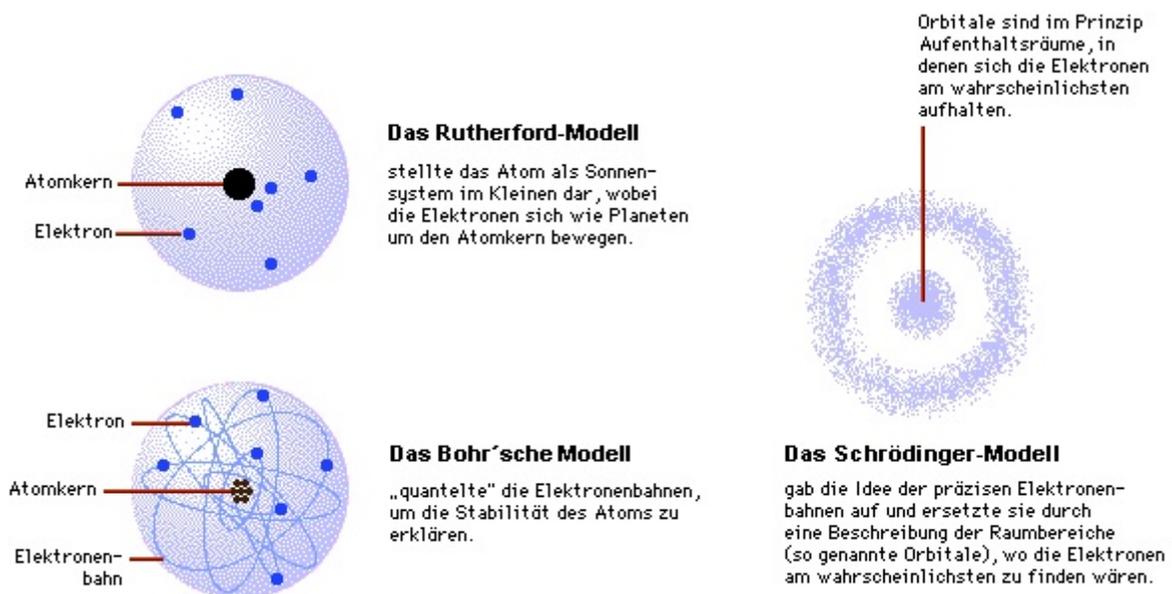
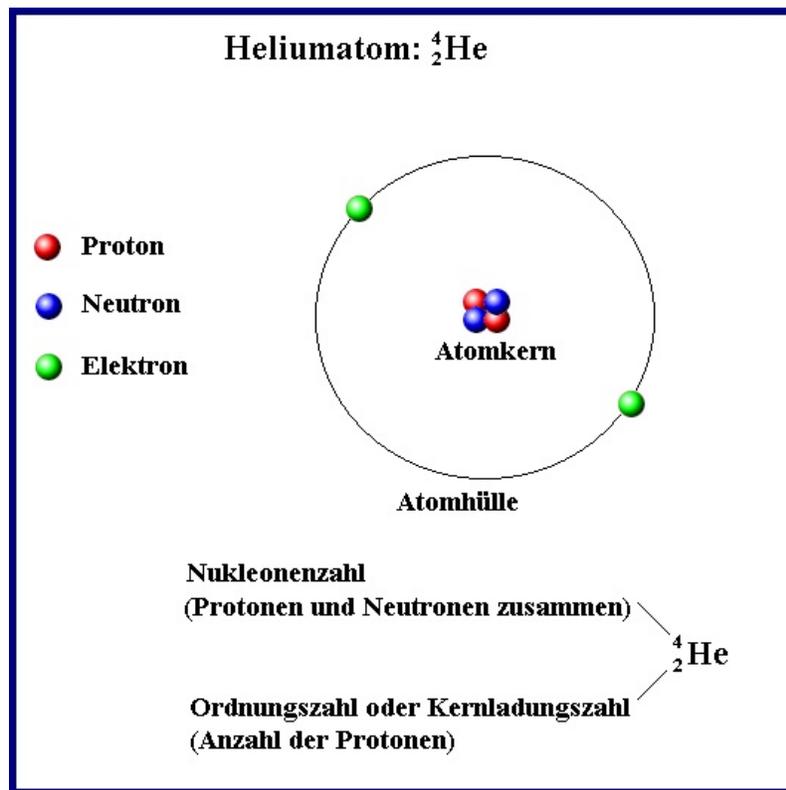


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung des Atomaufbaus. (Quelle: just-science.at)

- Die Masse eines Atoms (Massenzahl  $A$ ) mit  $Z$  Protonen und  $N$  Neutronen ist durch die folgende phänomenologische Formel (Weizsäcker-Massenformel) gegeben:

$$M(A, Z) = NM_n + ZM_p + Zm_e - a_v A + a_s A^{2/3} + a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} + a_a \frac{(N - Z)^2}{4A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

Der Massendefekt bzw. die Kernbindung spiegelt sich wieder in den Zusatztermen:

- Volumen, Oberfläche, Coulomb, Asymmetrie, Paarung

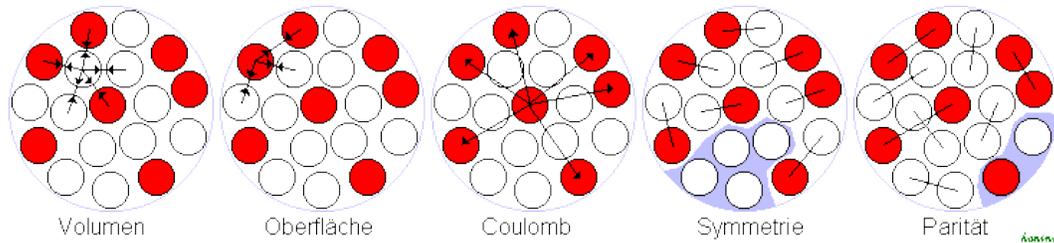


Abbildung 1.3: Tröpfchenmodell.

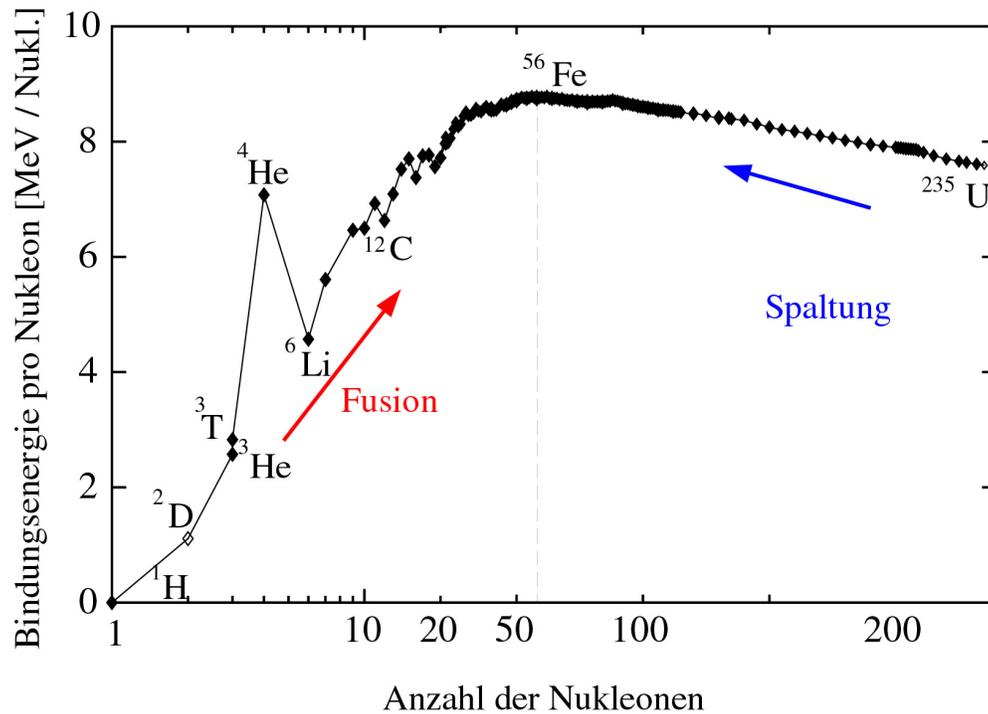


Abbildung 1.4: Abhängigkeit der Bindungsenergie pro Nukleon von der Anzahl der Nukleonen.

### 1.3.1 Ergänzung zur Bindungsenergie

Entscheidend ist die Betrachtung der Gesamtbilanz **Masse+Energie** vor und nach der Bildung eines Atomkerns, wobei zu beachten gilt, dass Masse als Energie aufgefasst werden kann:

vorher	nachher
Summe der Masse der Nukleonen keine Kräfte	Summe der Masse der Nukleonen Anziehungskraft zwischen den Nukleonen (etwas vermindert durch Coulombabstoßung zwischen den Protonen) liefert Zusatzenergie

Aufgrund der Energie, die in den Anziehungskräften im Kern steckt, hätte das System Atomkern mehr Energie als es als Einzelbausteine hatte. Um dies auszugleichen, wird ein Teil der Masse der Nukleonen in Energie umgewandelt und abgegeben. Damit bleibt die Gesamtbilanz **Masse+Energie** erhalten.

## 1.4 Kernspaltung

- Ein schwerer Atom-Kern wird durch Beschuss mit langsamen Neutronen in Schwingung versetzt.
- Er wird dadurch eingeschnürt und in zwei leichtere Kerne gespalten, hierbei werden sowohl Energie (Bindungsenergie) als auch weitere Neutronen (Kettenreaktion) freigesetzt.
- Die Temperatur beträgt etwa 100 Millionen Grad Celsius.

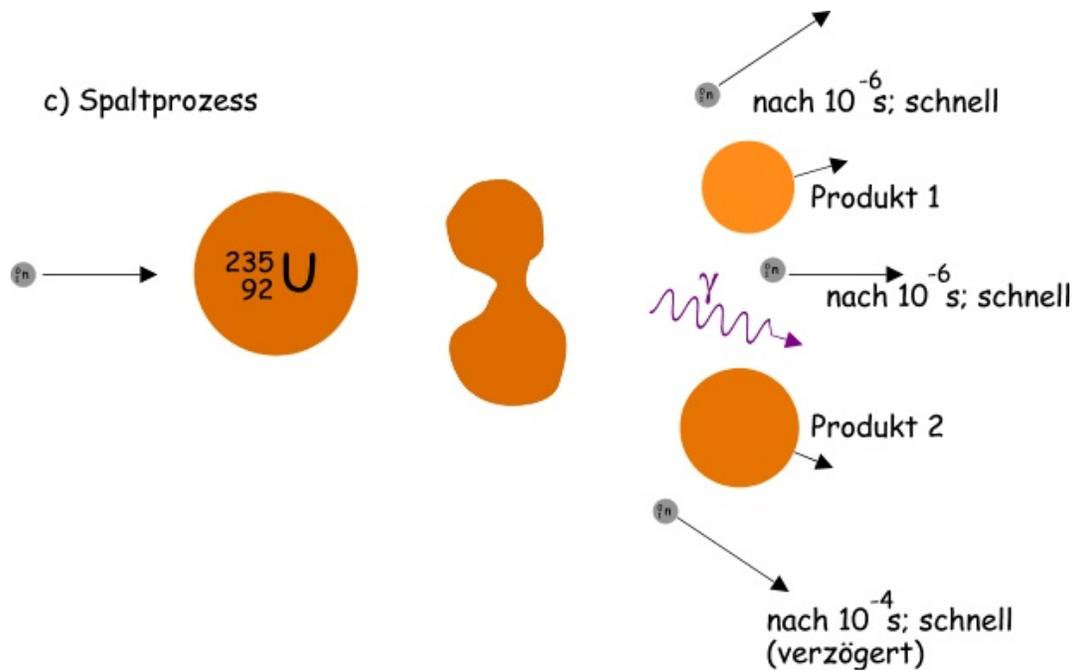


Abbildung 1.5: Schematische Darstellung einer Kernspaltung. (Quelle: [www.roro-seiten.de](http://www.roro-seiten.de))

## 1.5 Kernfusion

- Zwei leichte Kerne verschmelzen zu einem schwereren Kern unter Freisetzung von Energie. Die Temperatur muss hierzu etwa 100 Millionen bis mehrere Milliarden Grad Celsius betragen.
- Fusionsreaktionen können auch über den Tunneleffekt unterhalb der Coulomb-Barriere erfolgen
- Coulomb-Barriere:  
gegenseitige elektrische Abstoßung der positiv geladenen Kerne
- Tunneleffekt:  
quantenmechanischer Effekt, Teilchen werden als Wellenpakete betrachtet, die Pakete besitzen eine gewisse Wahrscheinlichkeit, Barrieren zu durchdringen

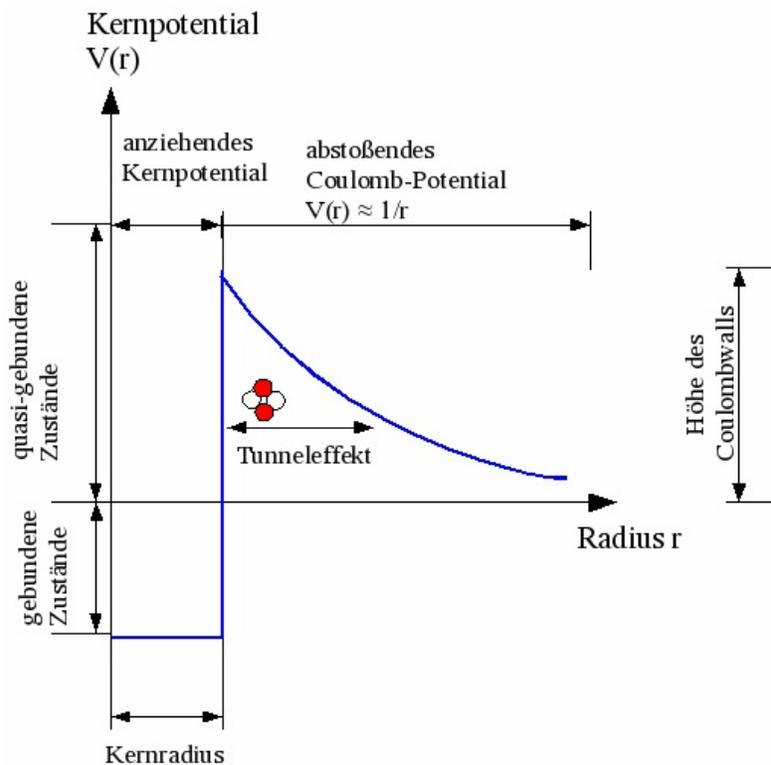


Abbildung 1.6: Schematische Darstellung des Tunneleffekts. (Quelle: wikipedia.de)

- Die Masse des bei der Fusion entstehenden Kerns ist kleiner als die Summe der beiden Einzelmassen der ursprünglichen Kerne: Massendefekt.  
Nach dem Äquivalenzprinzip ( $E = mc^2$ ) entspricht dies einer Energie, diese wird bei der Fusion frei (Großteil der Bindungsenergie).
- Alle Sterne, auch unsere Sonne, gewinnen ihre Energie durch Fusionsprozesse in ihrem Inneren (Elementsynthese).
- Kontrollierte Fusion in Reaktoren ist erst im Entwicklungsstadium (ITER). Probleme sind hierbei die hohe Temperatur (100 Millionen Grad Celsius) des Plasmas (heißes Gas) und die Methode, das Plasma in der Reaktorkammer einzuschließen, ohne dass es die Wände der Kammer berührt.

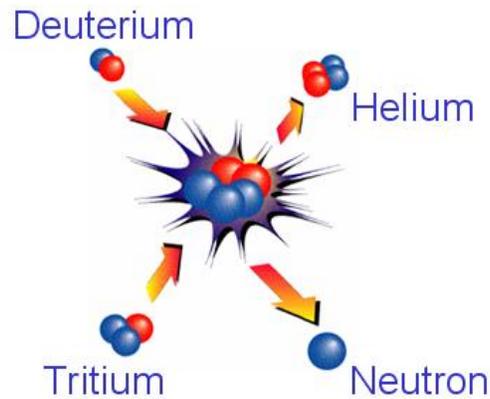


Abbildung 1.7: Schematische Darstellung einer Kernfusion. (Quelle: [www.itep.kit.edu](http://www.itep.kit.edu))

- Zwei Möglichkeiten, das Plasma einzuschließen sind magnetischer Einschluss (Tokamak, Stellarator, Iter) und Trägheitseinschluss (Laserfusion).

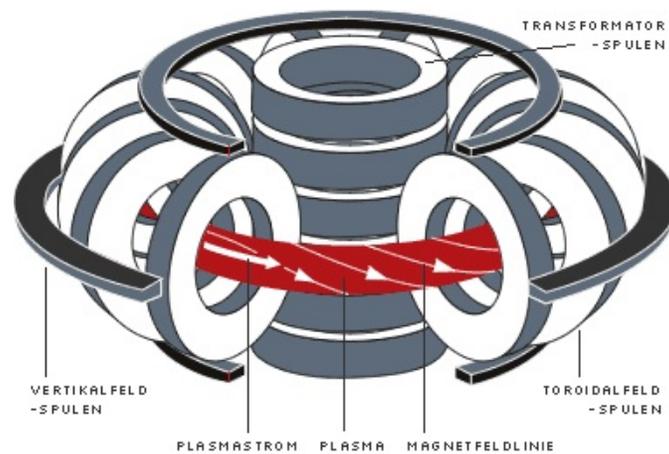


Abbildung 1.8: Schematische Darstellung eines Tokamak-Fusionsreaktors. (Quelle: [ipp.mpg.de](http://ipp.mpg.de))

## 1.6 $\alpha$ -Zerfall

- ein  $\alpha$ -Teilchen ( $2p+2n$ ) wird abgestrahlt, es entsteht ein neues Element mit einer um 2 niedrigeren Kernladungszahl
- es durchdringt die Coulomb-Barriere mittels Tunneleffekt
- Voraussetzung: es muss sich im Kern ein  $\alpha$ -Teilchen mit der nötigen Energie bilden, erst dann gibt es eine gewisse Wahrscheinlichkeit für einen  $\alpha$ -Zerfall
- die meisten  $\alpha$ -Strahler sind schwerer als Blei (neutronenreich)

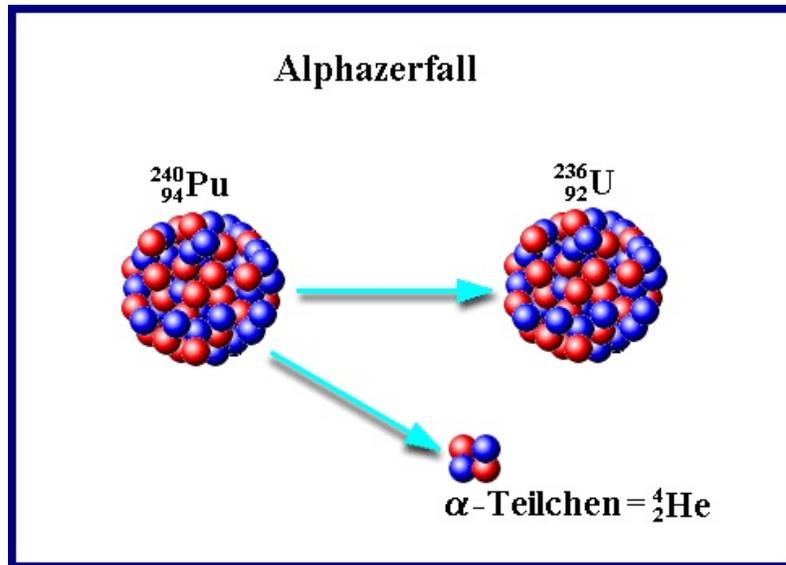


Abbildung 1.9: Schematische Darstellung des  $\alpha$ -Zerfalls. (Quelle: hpwt.de)

## 1.7 $\beta$ -Zerfall

- Es gibt zwei Arten von  $\beta$ -Zerfällen:  
 $\beta$ -minus-Zerfall:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$   
 $\beta$ -plus-Zerfall:  $p \rightarrow n + e^+ + \nu$
- es entsteht jeweils ein neues Element mit einer um 1 höheren bzw. niedrigeren Kernladungszahl
- Kern mit der kleinsten Masse in einem Isobarenspektrum (verschiedene Elemente mit derselben Massenzahl) ist stabil: höchste Bindungsenergie

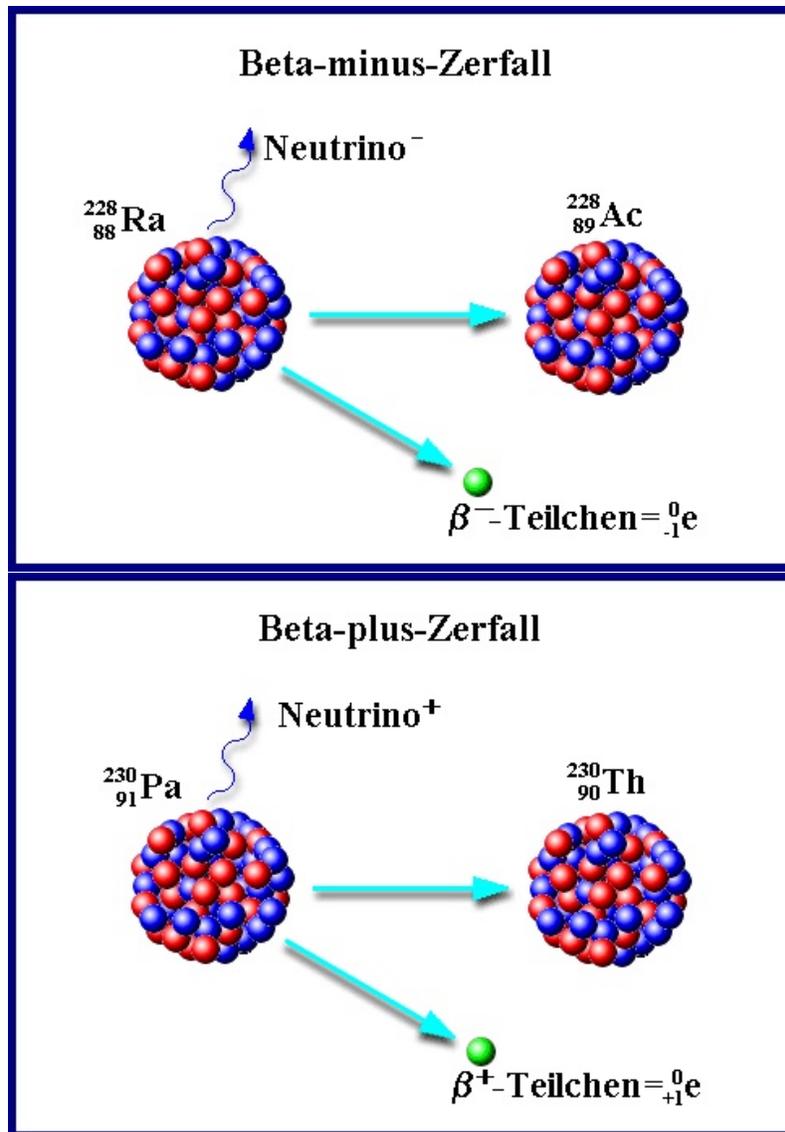


Abbildung 1.10: Schematische Darstellung des  $\beta$ -Zerfalls. (Quelle: hpwt.de)

## 1.8 $\gamma$ -Zerfall

- nach einem  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Zerfall befindet sich der entstandene Atomkern meist in einem energetisch angeregten Zustand. Durch Aussenden energiereicher  $\gamma$ -Strahlung regt er sich in den Grundzustand ab
- die Protonen- und Neutronenzahl des Kerns bleiben erhalten
- $\gamma$ -Strahlung ist keine Teilchenstrahlung, sondern elektromagnetische Wellen

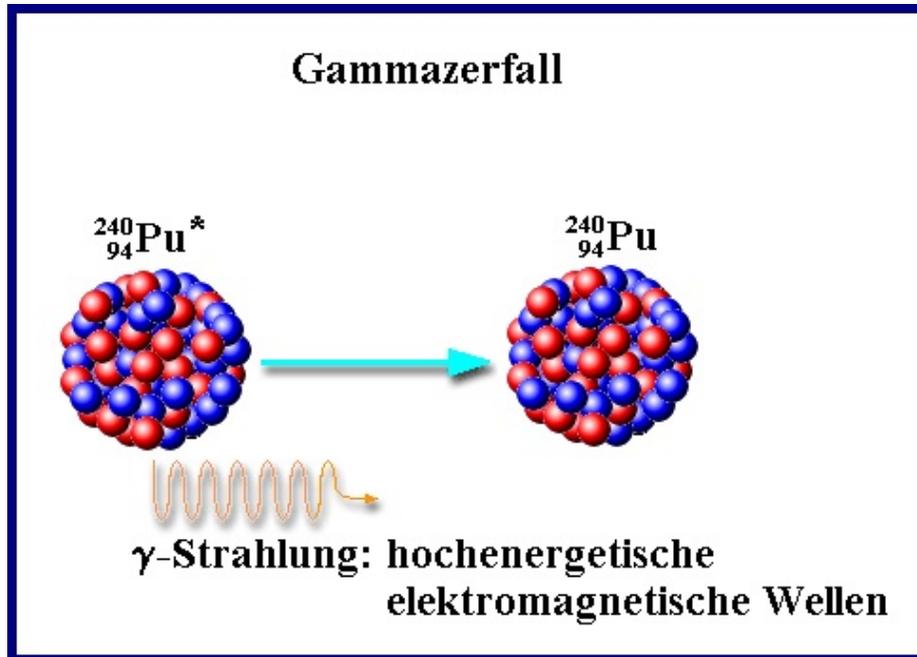


Abbildung 1.11: Schematische Darstellung des  $\gamma$ -Zerfalls. (Quelle: hpwt.de)

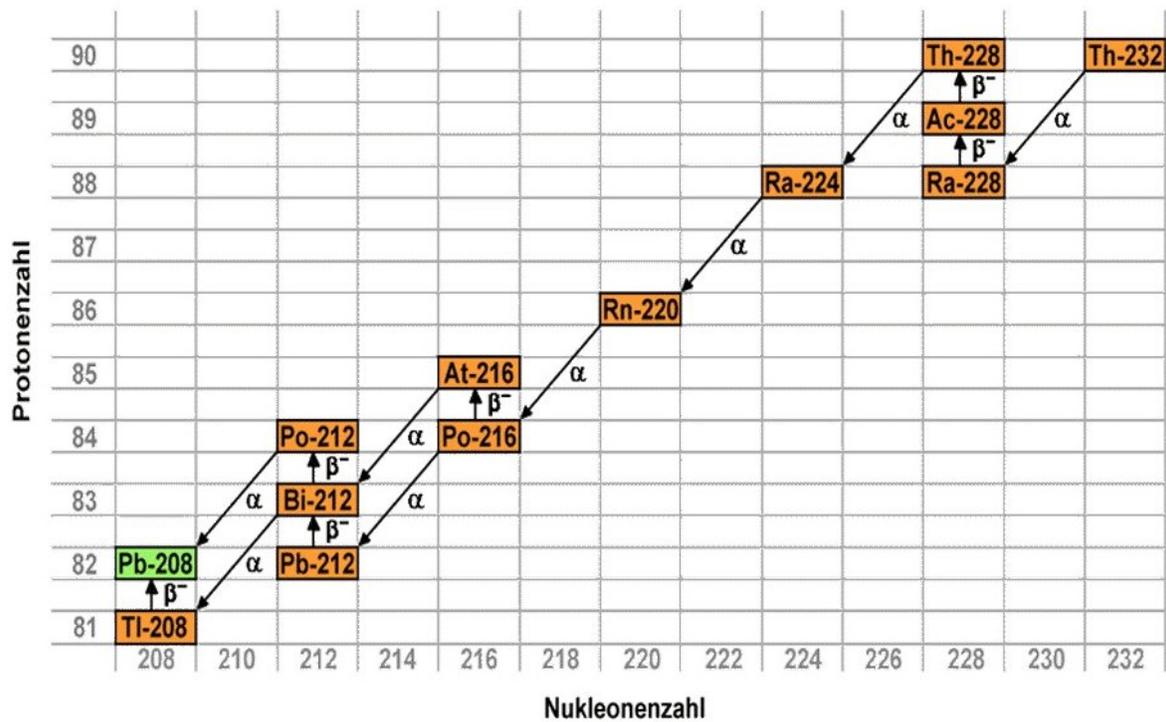


Abbildung 1.12: Zerfallsreihe des Thoriums. Endprodukt nach diversen  $\alpha$ - und  $\beta$ -Zerfällen ist stabiles Blei. (Quelle: periodensystem.net)

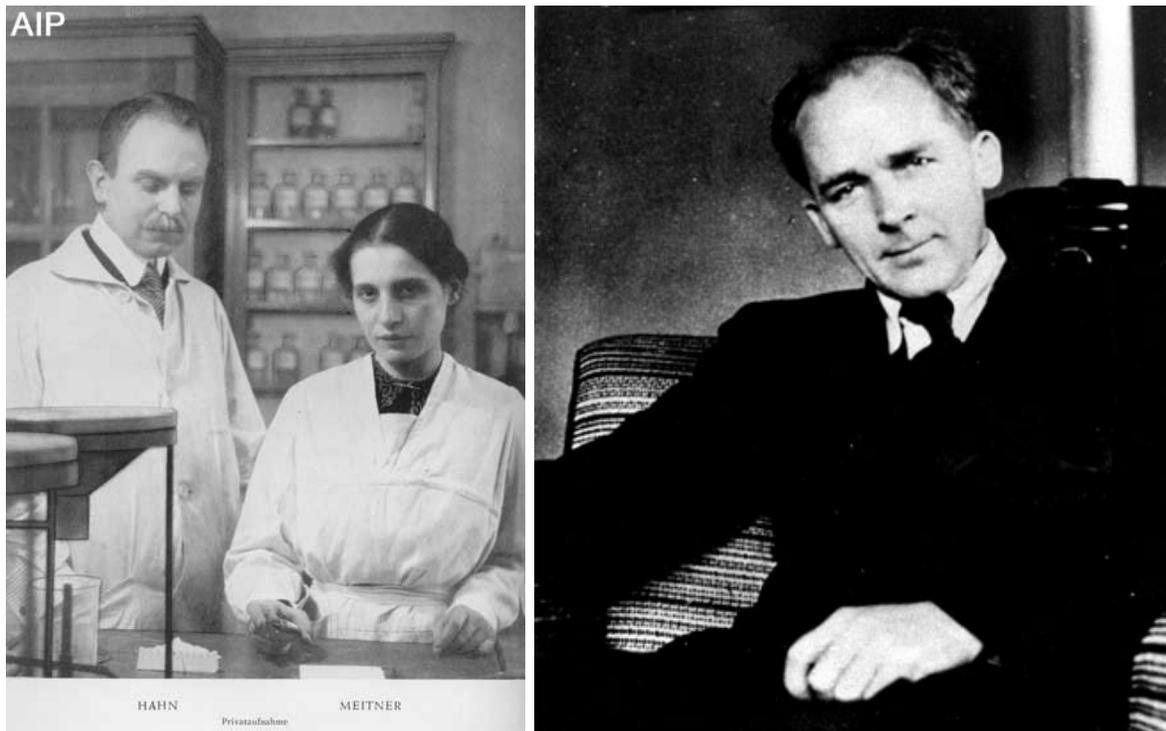
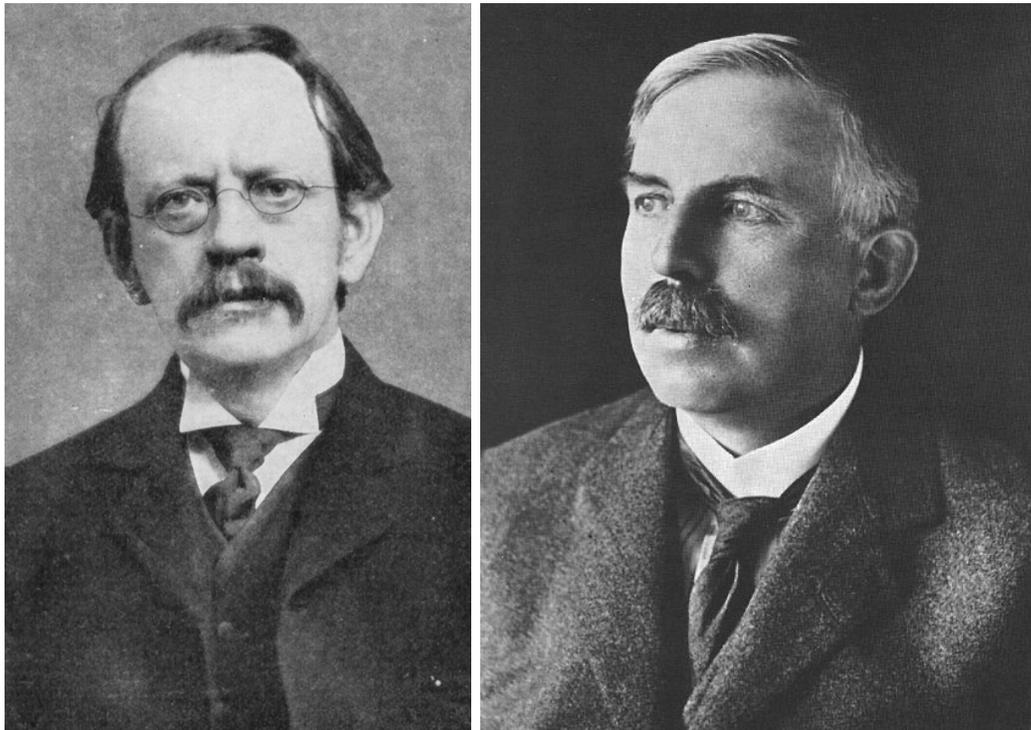
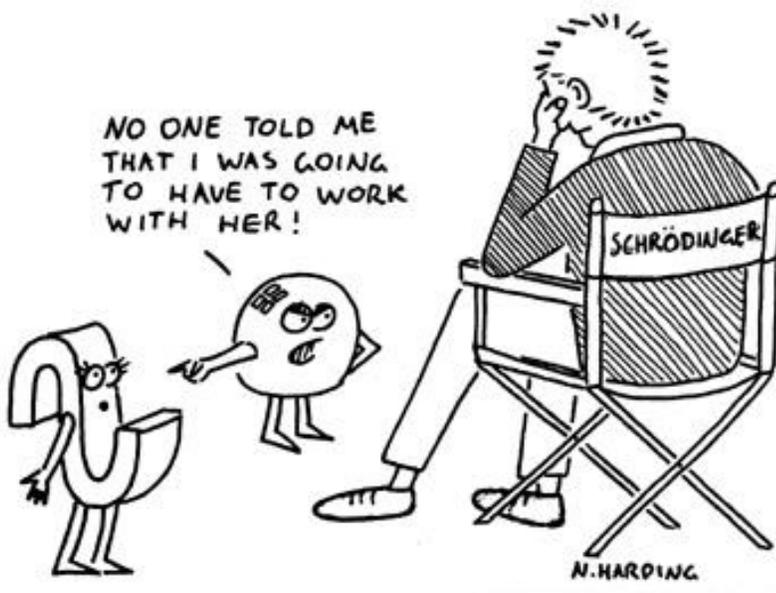


Abbildung 1.13: Sir Joseph John Thomson; Lord Ernest Rutherford; Otto Hahn und Lise Meitner; Fritz Strassmann

# Kapitel 2

## Das Licht und sein Spektrum



### 2.1 Literatur zur Vertiefung

- Bücher zu Atomphysik
- Experimentalphysikbücher zu Optik
- Experimentalphysikbücher zu Elektrodynamik

## 2.2 Allgemeines

Licht trägt viele Bezeichnungen: Lichtwelle, Photon, Gamma-Teilchen, elektromagnetische Strahlung, elektromagnetische Welle.

Wichtige Größen zur Beschreibung von Wellen (Abb. 2.1) sind

- Wellenlänge  $\lambda$ : Abstand zweier benachbarter Wellenberge
- Frequenz  $\nu$ : Anzahl der Wellenberge pro Sekunde
- Wellenlänge und Frequenz sind über die Lichtgeschwindigkeit  $c$  miteinander verbunden:  
 $c = \lambda \cdot \nu$
- Amplitude: Höhe eines Wellenberges
- Periodendauer: Zeit für den Durchgang zweier benachbarter Wellenberge

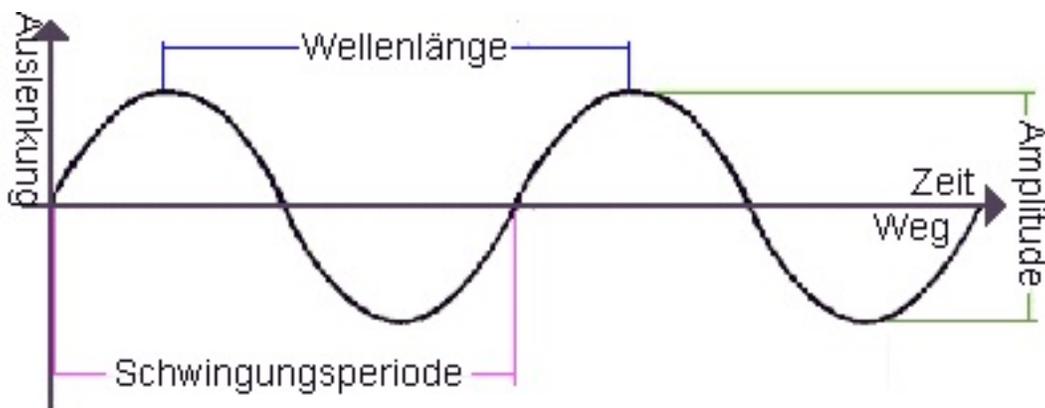


Abbildung 2.1: Begriffe zur Beschreibung einer Welle.

## 2.3 Der Wellenlängenbereich des Lichts

- Der Wellenlängenbereich (Frequenzspektrum) des Lichts reicht von langwelligeren Radiowellen bis zu extrem kurzwelligeren Gammastrahlen (Abb. 2.2).

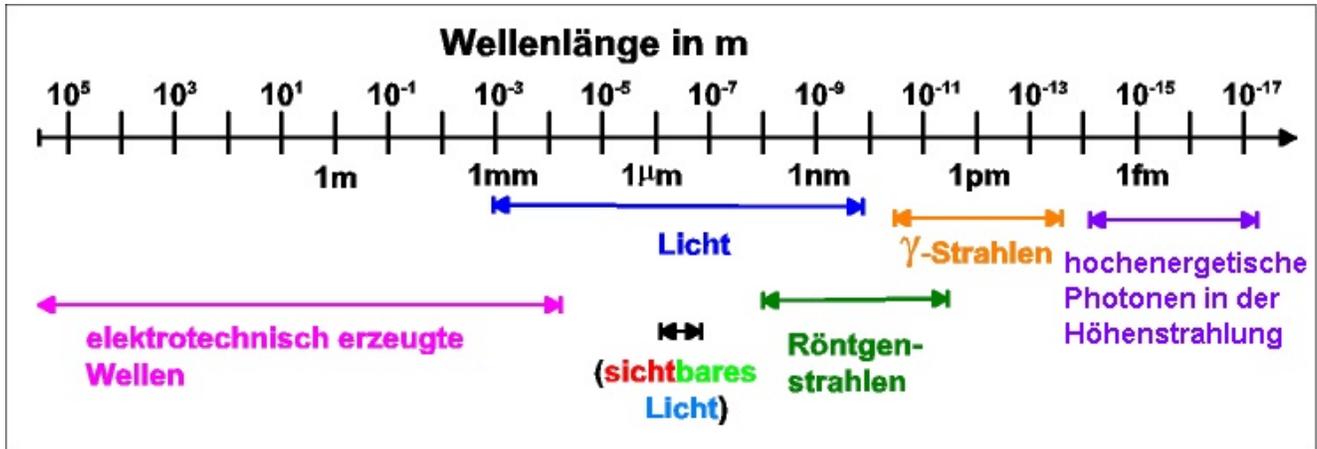


Abbildung 2.2: Das elektromagnetische Spektrum (Quelle: xplora.org).

- Das optisch sichtbare Licht ist dabei nur ein winziger Ausschnitt dieses Bereichs.
- Je größer die Frequenz  $\nu$  beziehungsweise je kleiner die Wellenlänge  $\lambda$  von Licht ist, desto größer ist die Energie  $E$  des Lichts ( $h$  ist dabei das Planck'sche Wirkungsquantum):

$$E = h \cdot \nu$$

- Die Durchlässigkeit der Erdatmosphäre für Licht ist sehr unterschiedlich für die verschiedenen Wellenlängenbereiche (Abb. 2.3)

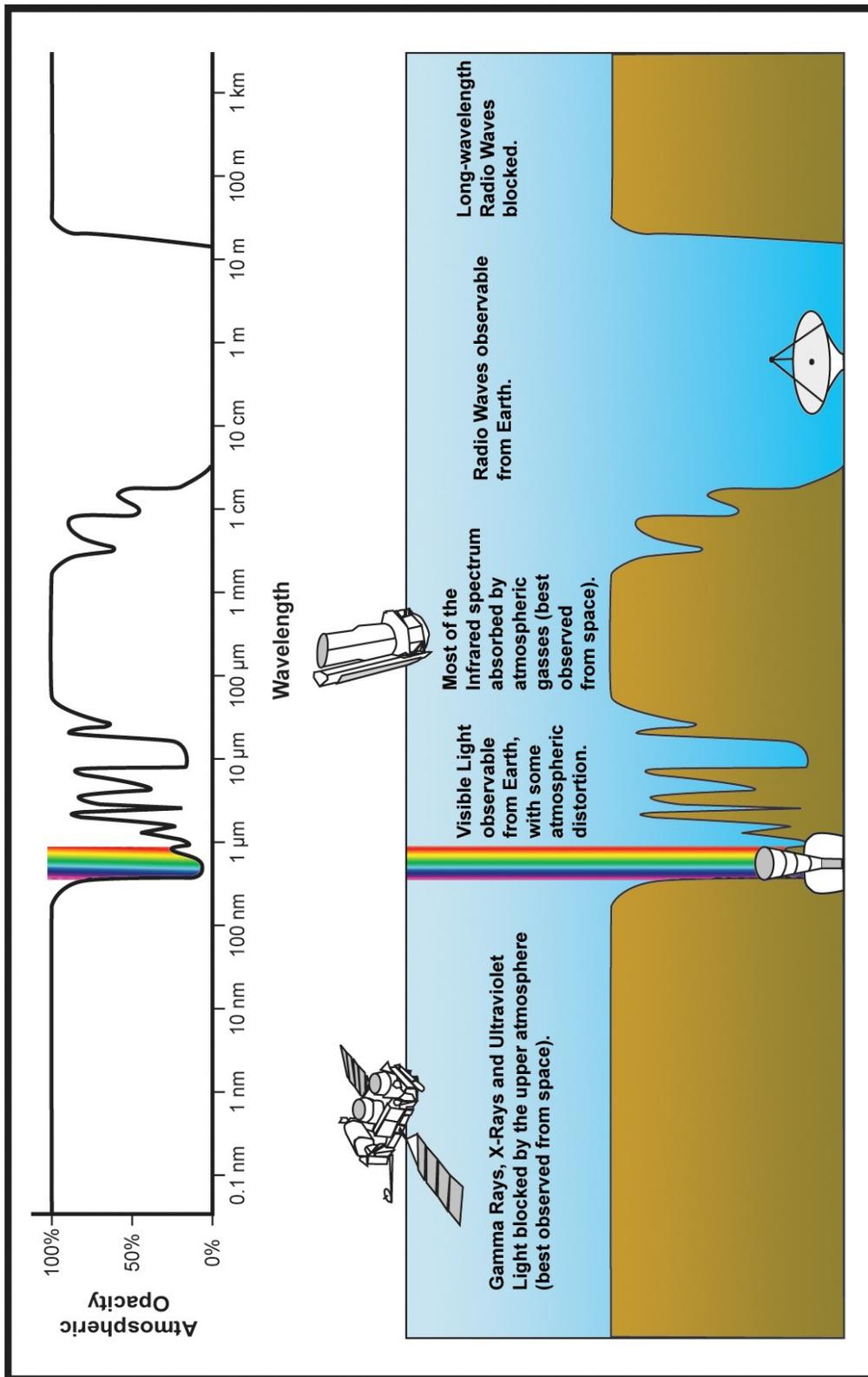


Abbildung 2.3: Durchlässigkeit der Erdatmosphäre für elektromagnetische Wellen (Quelle: wikivisual.com).

## 2.4 Woher stammt das Licht in unserem Alltag ?

- Sonne: Kernfusionsprozesse tief im Inneren der Sonne (Abb. 2.4), Wasserstoffatomkerne fusionieren zu Helium. Licht braucht etwa eine Million Jahre, um aus dem Inneren an die Sonnenoberfläche zu gelangen und abgestrahlt werden zu können.

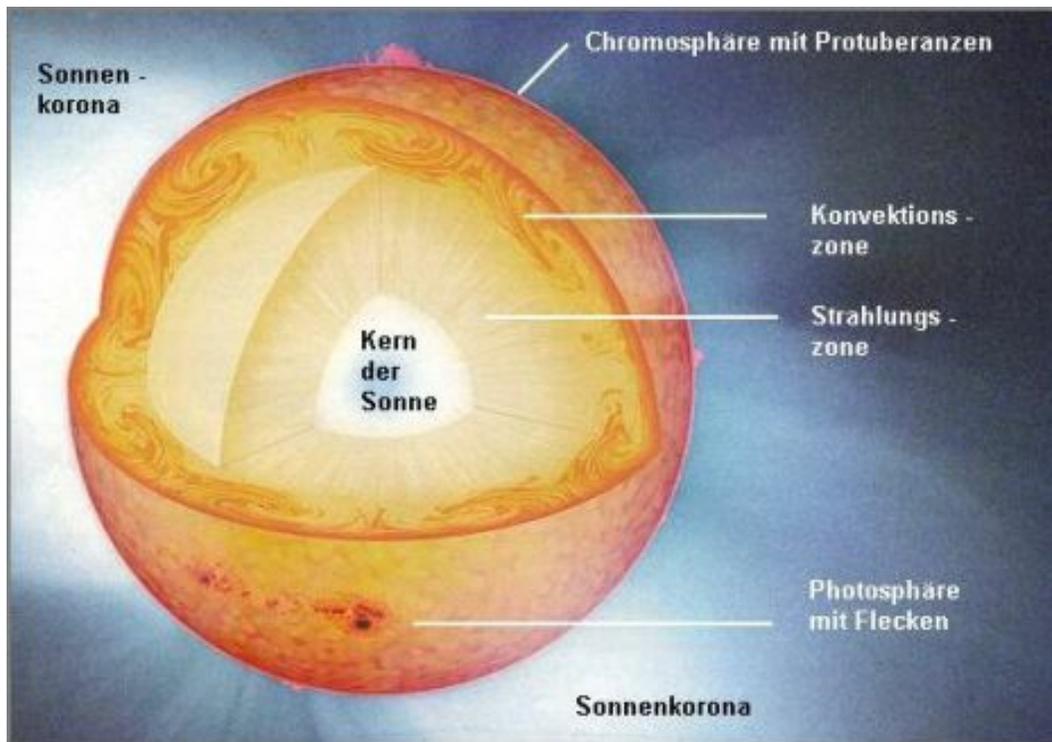


Abbildung 2.4: Der innere Aufbau der Sonne (Quelle: [www.mps.mpg.de](http://www.mps.mpg.de)).

- Glühbirne: Der Draht (Abb. 2.5) wird zum Glühen gebracht, die im Draht sich befindenden Ladungen dadurch zu beschleunigten Bewegungen veranlasst („zickzack“). Da beschleunigte Ladungen immer elektromagnetische Strahlung abgeben (Naturgesetz), wird sogenannte Temperaturstrahlung abgestrahlt. Nur wenige Prozent werden bei der Glühbirne allerdings im sichtbaren Bereich emittiert, das meiste ist Wärmestrahlung (infrarot): Es entsteht ein kontinuierliches Spektrum, d.h. Abstrahlung erfolgt über den gesamten Wellenlängenbereich des Lichts.
- Leuchtstoffröhre: Gasatome werden durch Stöße mit freien Elektronen angeregt, d.h. ein Elektron wechselt in eine höhere Bahn (Niveau); beim Rücksprung in den Grundzustand (unterstes Niveau) emittieren sie ein für das Atom charakteristisches Licht, unter Umständen muss es durch eine Beschichtung der Glaswand in sichtbares Licht umgewandelt werden (Abb. 2.6). Es entsteht ein Linienspektrum, Abstrahlung erfolgt nur bei ganz bestimmten Wellenlängen.

## Glühlampe

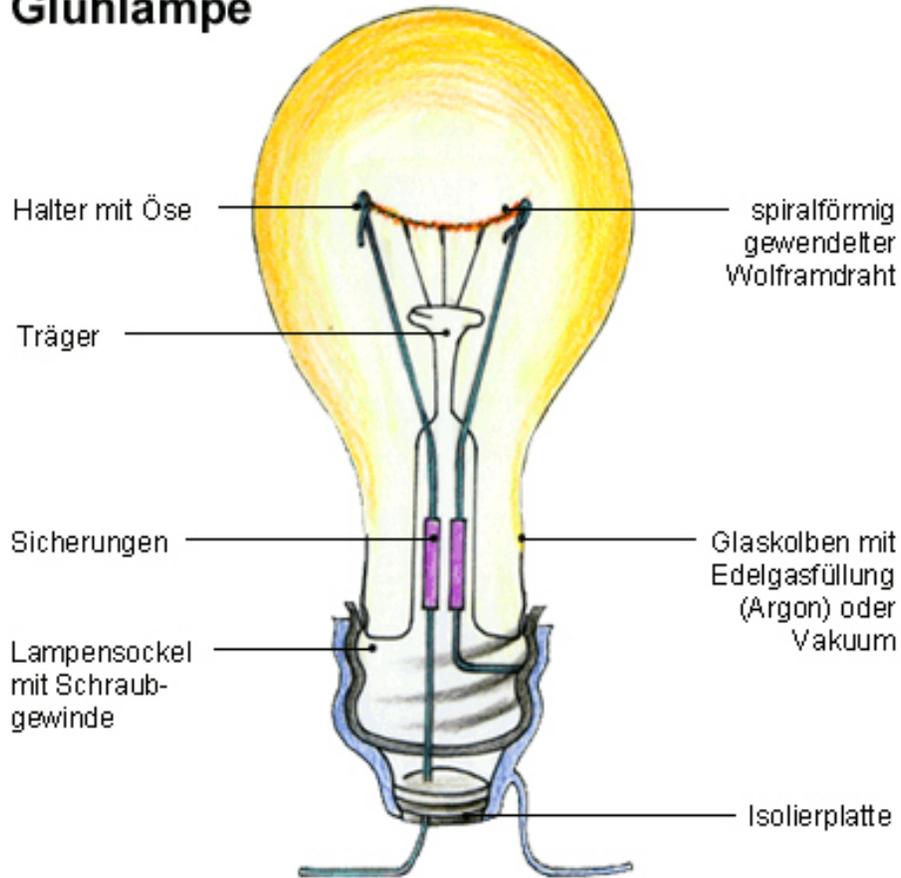


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung einer Glühlampe (Quelle: [www.gmw24.com](http://www.gmw24.com)).

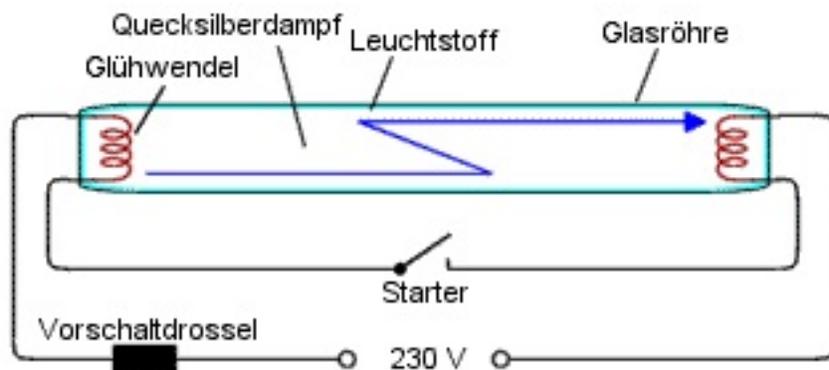


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung einer Leuchtstoffröhre (Quelle: [elektronikinfo.de](http://elektronikinfo.de)).

### 2.4.1 Einschub: Das Schalenmodell des Atoms

- Ein Schalenelektron eines Atoms kann durch ein auftreffendes Photon oder durch einen Stoß mit einem freien Elektron auf eine höhere Schale gehoben (Anregung) oder aus dem Atom herausgelöst (Ionisation) werden. Die Energie des Photons muss bei der Anregung genau der Energiedifferenz der Schalen entsprechen. Das Elektron gibt lediglich den notwendigen Teil seiner kinetischen Energie ab.
- Ein freies Elektron kann von einem Ion eingefangen werden (Rekombination), ein Photon wird abgestrahlt. Seine Wellenlänge ergibt sich aus der Differenz der kinetischen Energie des Elektrons und des Energieniveaus der Schale.
- Ein Schalenelektron wechselt in eine tieferliegende Schale (Abregung), ein Photon wird abgestrahlt. Seine Wellenlänge ergibt sich aus der Energiedifferenz der Elektronenschalen.

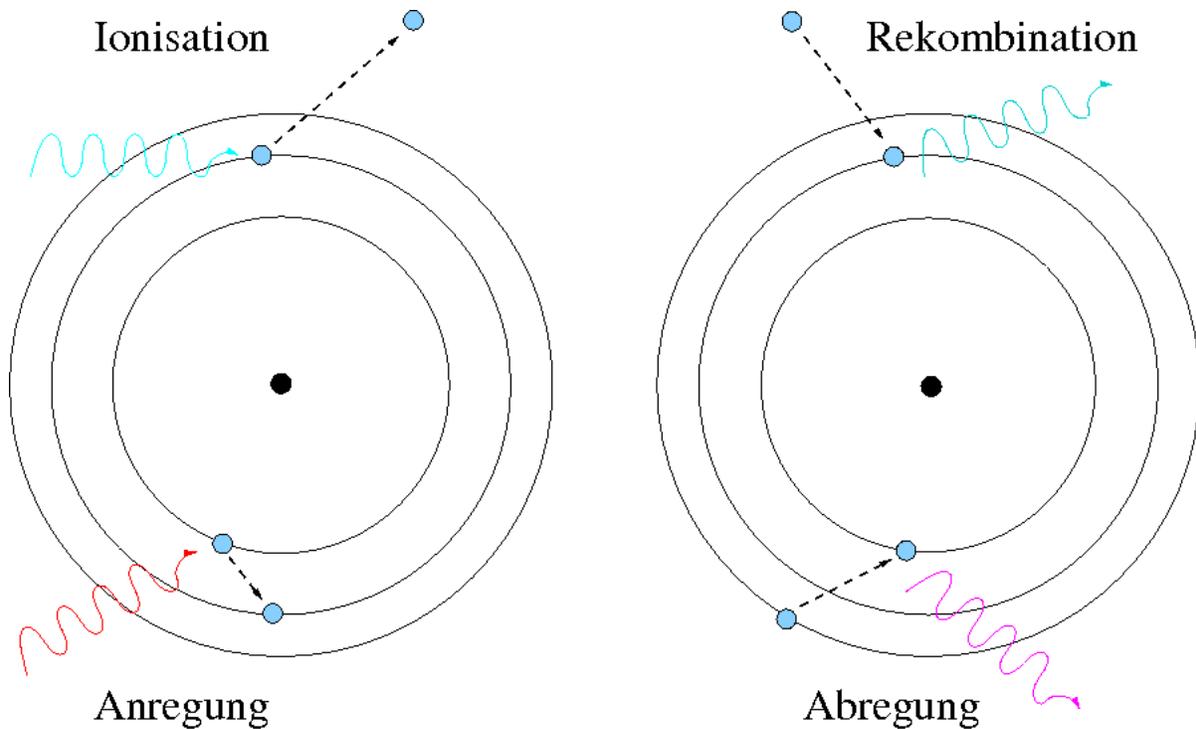


Abbildung 2.7: Elektronenübergänge im Schalenmodell des Atoms.

## 2.5 Das Spektrum

Helligkeit bzw. Intensität ist die Summe des Lichts eines großen (des gesamten) Wellenlängenbereichs. Das Auge nimmt z.B. den gesamten optischen Wellenlängenbereich gleichzeitig als Helligkeit wahr. Ein Spektrum bedeutet die Zerlegung des Lichts in einzelne Wellenlängen bzw. Frequenzen und Messung der Helligkeit für jede einzelne Wellenlänge.

Problem: Wie lässt sich ein Spektrum erzeugen ?

### 2.5.1 Das Kontinuumsspektrum

- Ursache: Temperaturstrahlung (z. B. glühendes Metall)
- Verlauf der Intensität  $B$  des Kontinuums (Abb. 2.8) wird im Wesentlichen durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschrieben ( $k$  ist hierbei die Boltzmann-Konstante):

$$B = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

- für den Zusammenhang zwischen Temperatur  $T$  und Fluss  $F$  gilt das Stefan-Boltzmann-Gesetz ( $\sigma$  ist hierbei die Stefan-Boltzmann-Konstante):

$$F = \sigma \cdot T^4$$

- für den Zusammenhang zwischen Temperatur  $T$  und Wellenlänge  $\lambda_{\max}$  des Flussmaximums gilt das Wien'sche Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{const}$$

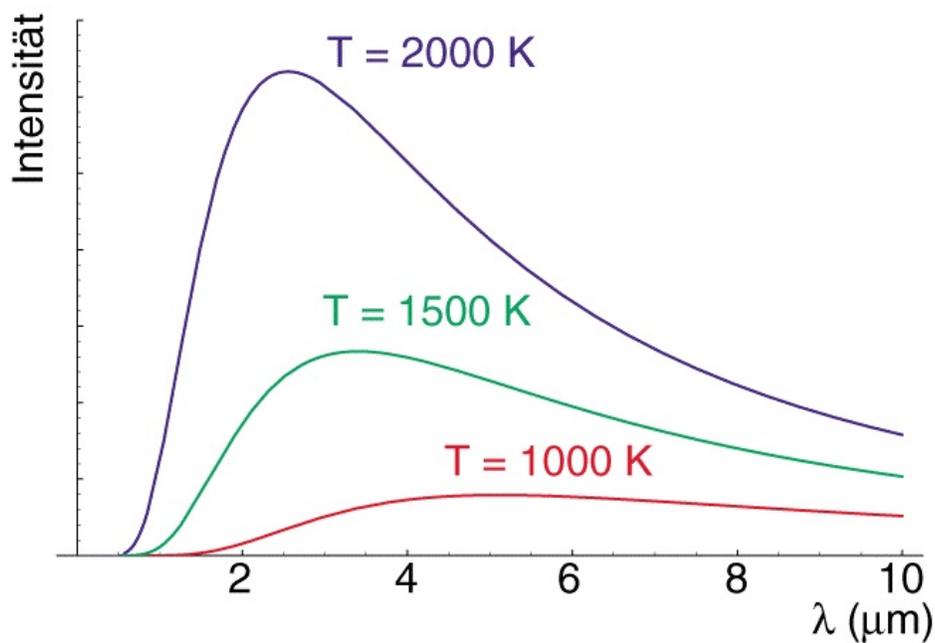


Abbildung 2.8: Kontinuumsspektren für verschiedene Temperaturen.

## 2.5.2 Das Linienspektrum

- Ursache: Absorption und Emission von Licht durch Materie (üblicherweise Gas)
- Absorption: ein auftreffendes Photon wird von einem Hüllenelektron verschluckt (absorbiert), gibt dabei seine Energie an das Elektron ab und regt es in ein höheres Energieniveau an.
- Emission: ein angeregtes, in einem höheren Energieniveau befindliches Elektron fällt zurück in ein energetisch günstigeres, niedrigeres Energieniveau und gibt dabei Energie in Form eines Photons ab.
- Energieniveaus der Elektronen eines Atoms sind quantisiert (besitzen ganz bestimmte Werte).
- Absorption und Emission ist deshalb nur bei ganz bestimmten, für jedes Element charakteristischen Wellenlängen bzw. Frequenzen möglich ( $E = h \cdot \nu$ ): Fingerabdruck des Elements.

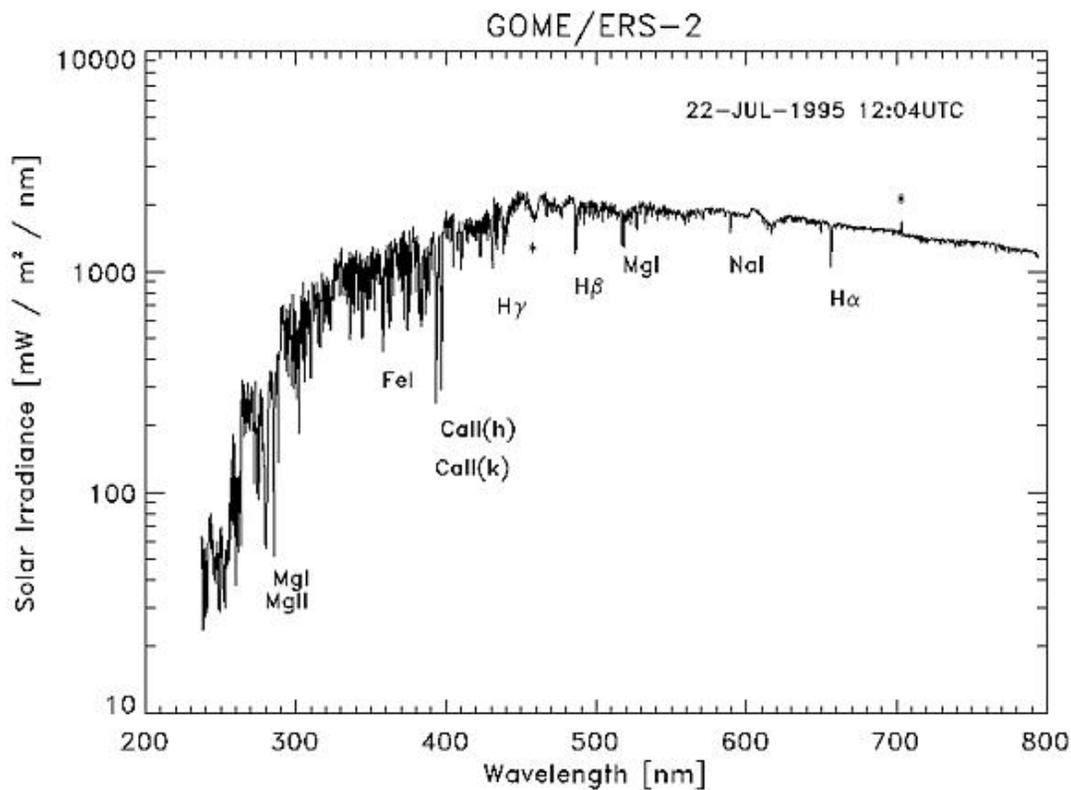


Abbildung 2.9: Das Linienspektrum unserer Sonne (Quelle: Weber et al. 1998).

## 2.6 Dualität des Lichts

Zwei verschiedene Effekte erklären Licht im Alltag:

- Glühbirne: beschleunigte Ladung führt zu *Abstrahlung elektromagnetischer Wellen*
- Leuchtstoffröhre: Abregung eines angeregten Atomzustandes führt zu *Abstrahlung eines Photons*

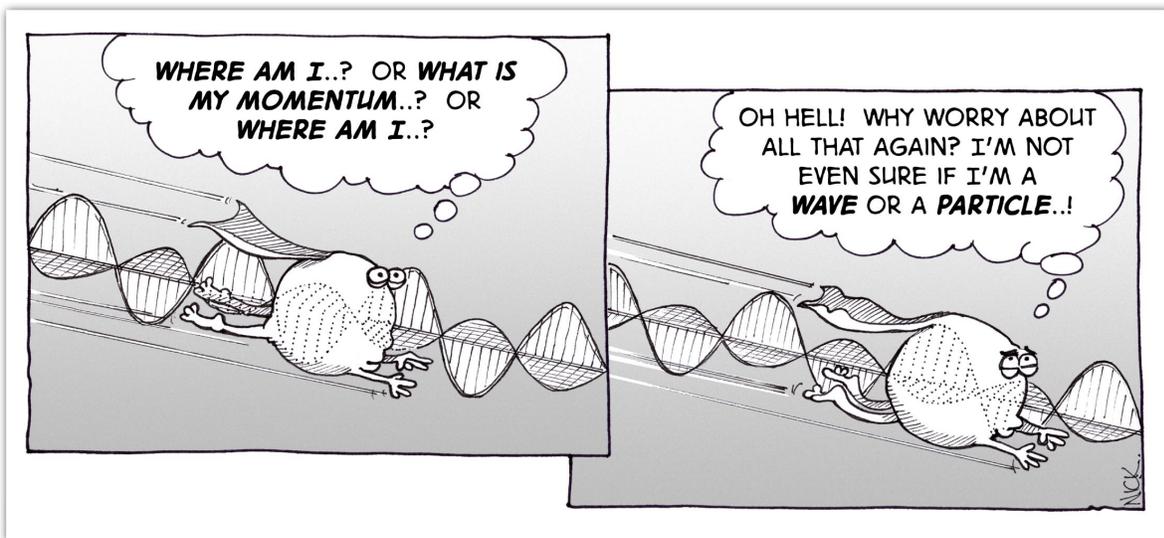
Licht vereinigt also die Eigenschaften eines Teilchens und einer Welle:

→ **Dualität des Lichtes**

Beide Eigenschaften lassen sich experimentell mit Hilfe des Photoeffekts (Teilchen) bzw. der Interferenz (Welle) beweisen. 1924 postulierte Louis-Victor de Broglie, dass der Welle-Teilchen-Dualismus nicht nur für Licht sondern auch für Materie gilt (Nobelpreis Physik 1929). Bereits drei Jahre später wurden für Elektronen Welleneigenschaften mittels Interferenzversuchen nachgewiesen. 1960 wurde an der Universität Tübingen der Doppelspaltversuch erfolgreich mit Elektronen durchgeführt. Für die Wellenlänge  $\lambda$  von Teilchen gilt

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

wobei  $h$  wieder das Planck'sche Wirkungsquantum und  $p$  der relativistische Impuls sind.



Photon self-identity issues

### 2.6.1 Der Photoeffekt (1888 entdeckt)

Bestrahlt man eine negativ aufgeladene Metallplatte (Zink) mit UV-Licht, so wird die Platte entladen, eine positiv aufgeladene Platte entlädt sich jedoch nicht (Abb. 2.10). Man folgert hieraus, dass Licht Elektronen aus der Platte freisetzt. Außerdem findet man:

- Die Energie der freigesetzten Elektronen (messbar als kinetische Energie) ist dabei nicht abhängig von der Intensität (Strahlungsleistung, Anzahl Photonen pro Sekunde) des Lichtes, sondern nur von dessen Wellenlänge.
- Die Anzahl der freigesetzten Elektronen ist jedoch abhängig von der Intensität.
- Elektronen werden nur freigesetzt, wenn das Licht eine für jedes Material charakteristische Mindestfrequenz und damit Mindestenergie ( $E = h \cdot \nu$ ) hat (Austrittsarbeit).

Der Photoeffekt kann nur verstanden werden, wenn Licht aus einzelnen Teilchen, den Photonen, besteht, die beim Stoß mit den Elektronen ihre Energie abgeben (Lichtquantenhypothese, von A. Einstein 1905 postuliert, er erhielt dafür 1921 den Nobelpreis in Physik). Bei einer Welle hingegen sitzt die Energie in der Amplitude (Intensität).

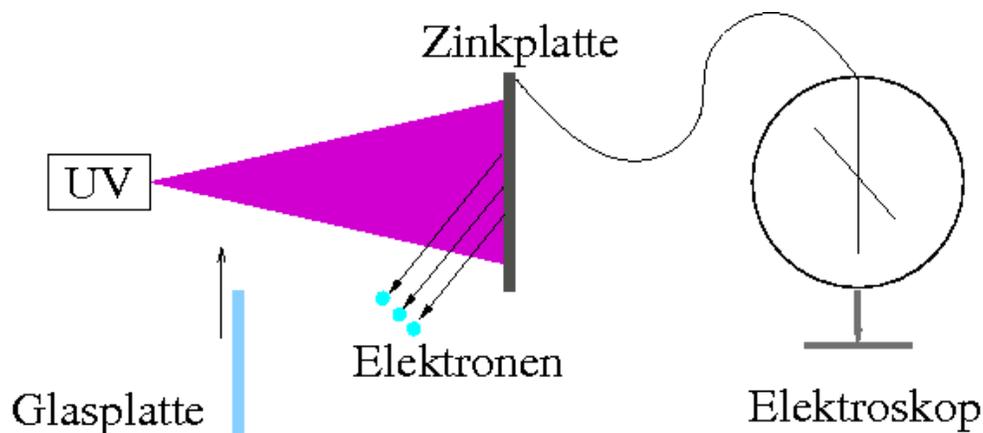


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung eines Experiments zum Photoeffekt.

## 2.6.2 Interferenz

- (ungestörte) Überlagerung mehrerer Wellen (Wasserwellen, 2 Lautsprecher,..., siehe Abb. 2.11)
- zwei Wellenberge werden zu einem größeren Wellenberg, zwei Wellentäler zu einem größeren Wellental (konstruktive Interferenz)
- trifft Wellenberg auf Wellental, löschen sie sich gegenseitig aus (destruktive Interferenz)
- Licht zeigt Interferenz, z. B. Laserstrahl auf ein Gitter liefert ein typisches Interferenzmuster. Licht besteht also aus Wellen.

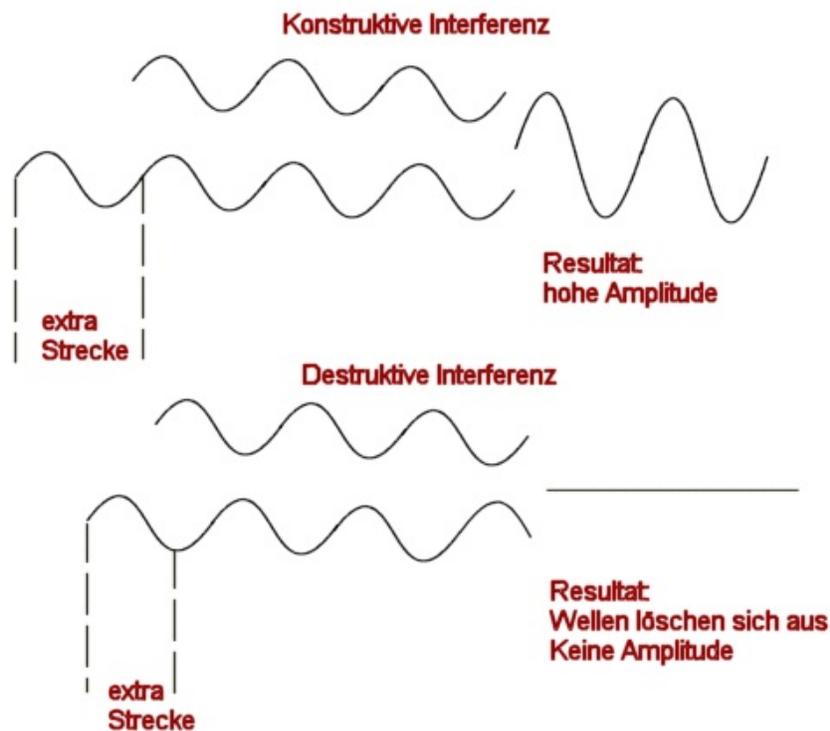


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung der Interferenz zweier Wellen.

## 2.7 Maxwell-Gleichungen

Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen wird mit Hilfe der Maxwell-Gleichungen, die James Clerk Maxwell 1861-1864 entwickelt hat, beschrieben. Ihre Hauptaussagen sind:

- ein zeitlich sich änderndes elektrisches Feld  $\vec{E}$  erzeugt ein magnetisches Feld  $\vec{B}$

$$\oint \vec{B} d\vec{s} = \mu_0 I + \frac{1}{c^2} \frac{d}{dt} \int \vec{E} d\vec{A}$$

- ein zeitlich sich änderndes Magnetfeld  $\vec{B}$  erzeugt ein elektrisches Feld  $\vec{E}$

$$\oint \vec{E} d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} d\vec{A}$$

- elektrische Ladungen  $Q$  sind die Quellen elektrischer Felder  $\vec{E}$

$$\oint \vec{E} d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

- es gibt keine magnetischen Ladungen als Quellen magnetischer Felder  $\vec{B}$

$$\oint \vec{B} d\vec{A} = 0$$

Das elektrische und das magnetische Feld stehen senkrecht zueinander.

# Kapitel 3

## Einführung in die Quantenphysik

### 3.1 Allgemeines

Am Beginn des 20. Jahrhunderts wurde die Physik durch zwei Theorien revolutioniert:

- **Relativitätstheorie**

Die von Albert Einstein entwickelte spezielle und allgemeine Relativitätstheorie führt zu einer neuen Beschreibung der Vorgänge und Struktur des Makrokosmos (Kapitel 6).

- **Quantenphysik**

Diese Theorien liefern eine völlig neue Einsicht in die Vorgänge des Mikrokosmos (Physik auf atomarer Ebene). An ihrer Entwicklung waren über viele Jahrzehnte zahlreiche Wissenschaftler beteiligt, am bekanntesten sind Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, Arnold Sommerfeld, Werner Heisenberg, Max Born, Erwin Schrödinger, Paul Dirac, Wolfgang Pauli, Richard Feynman etc.

Die Quantenphysik umfasst inzwischen eine ganze Sammlung von Theorien, die allesamt mathematisch kompliziert und unanschaulich sind, sich aber extrem bewährt haben, da ihre Vorhersagen experimentell außerordentlich genau verifiziert werden können. Es sind dies die

- **Quantenmechanik QM**

beschreibt Messvorgänge auf atomarer Ebene, Stichworte sind u.a. Schrödingergleichung, Unschärfe, wird als Begriff meist stellvertretend für alle Quantentheorien verwendet .

- **Quantenelektrodynamik QED**

ist die exakte Theorie des Elektromagnetismus, beschreibt u.a. alle Vorgänge, bei denen Elektronen und Photonen wechselwirken, gilt als eine der am besten verifizierten Theorien überhaupt.

- **Quantenchromodynamik QCD**

beschreibt die starke Wechselwirkung, also die Kraft die Atomkerne zusammenhält.

- **Quantengeometrodynamik QGD**

sollte die allgemeine Relativitätstheorie als Quantentheorie beschreiben, ist aber unvollendet und im Moment nicht mehr in Mode, man konzentriert sich stattdessen auf Stringtheorien.

- **Quantenfeldtheorien**

Erweiterung der Quantenmechanik, Teilchen und Felder werden gleich behandelt, Felder quantisiert. QED und QCD sind solche Quantenfeldtheorien.

Um die Quantenphysik und ihre Theorien zu verstehen, ist selbst ein mehrjähriges Physikstudium nicht ausreichend. Wir wollen uns im Rahmen des Physikkurses lediglich auf einige Auswirkungen bzw. Phänomene beschränken, die die Quantenphysik mit sich bringt und die zum Teil recht ungewöhnlich sind.

Ein wesentliches Konzept der Quantenphysik ist das Abrücken von absoluten Aussagen. Stattdessen wird alles im Rahmen von Wahrscheinlichkeiten beschrieben. Es hat sich gezeigt, dass dies zur Beschreibung der Vorgänge auf atomarer und subatomarer Ebene notwendig ist, mit all den daraus sich ergebenden verrückt erscheinenden Folgen. Für makroskopische Systeme, also im täglichen Leben (z.B. gegen eine Tür rennen), reicht jedoch die klassische Beschreibung.

## 3.2 Heisenberg'sche Unschärferelation

Werner Heisenberg hat 1927 entdeckt, dass es eine wesentliche Eigenschaft der Natur ist, dass bei einem Teilchen (z.B. Elektron) niemals gleichzeitig zwei bestimmte Eigenschaften exakt bestimmt werden können. Der Messprozess selbst beeinflusst bereits das Ergebnis.

- **Ort-Impuls-Unschärfe:**

Aufenthaltort  $x$  und Impuls  $p$  (Masse  $\times$  Geschwindigkeit) können nicht gleichzeitig exakt gemessen werden

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

- **Energie-Zeit-Unschärfe:**

Energie  $E$  und Zeit  $t$  (Lebensdauer) können nicht gleichzeitig exakt gemessen werden

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

## 3.3 Doppelspalt-Experiment

Das Doppelspaltexperiment, zum ersten Mal von Thomas Young 1802 mit Licht durchgeführt, zeigt sehr eindrucksvoll den Welle-Teilchen-Dualismus und gilt als eines der wichtigsten Experimente überhaupt. Es kann sowohl mit Licht als auch mit Teilchen erfolgen. Abbildung 3.1 zeigt den prinzipiellen Ablauf:

Monochromatisches Licht (Laser, eine bestimmte Wellenlänge) oder Teilchen (z.B. Elektronen) trifft auf den Doppelspalt. Hinter dem Doppelspalt entsteht ein Streifenmuster, sog. Interferenzstreifen. Sie sind typisch für die Überlagerung von Wellen (siehe Kap. 2). Damit wird also die Welleneigenschaft von Licht bzw. Teilchen bewiesen. Man kann dieses Experiment sogar mit einzelnen Photonen oder Elektronen durchführen, auch dann erhält man ein Interferenzmuster. Das bedeutet, dass jedes einzelne Elektron mit sich selbst interferiert, bzw. im Teilchenbild würde das bedeuten, dass das einzelne Elektron gleichzeitig durch beide Spalte läuft. Man spricht von einer Überlagerung zweier Zustände (Möglichkeiten), die beide gleichermaßen erfüllt sind.

Wenn man nun versucht experimentell zu messen, durch welchen Spalt das Elektron gelaufen ist, dann verschwindet das Interferenzmuster und man misst tatsächlich, dass das Elektron nur durch einen der beiden Spalte geht. Die Messung hat also das Ergebnis beeinflusst. Diese Erkenntnis hat weitreichende Folgen, auch philosophischer Natur. Salopp formuliert bedeutet dies, dass das was wir als Wirklichkeit empfinden, erst dann bzw. dadurch entsteht wenn wir hinsehen.

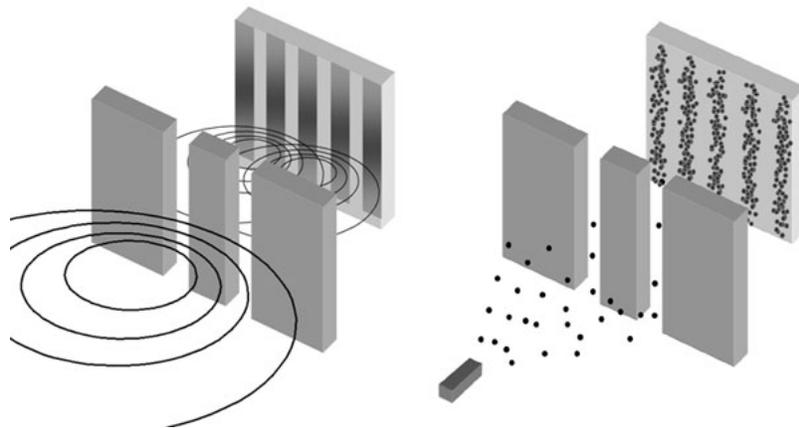


Abbildung 3.1: Doppelspaltexperiment mit Wellen (links) und Teilchen (rechts). Beides mal entsteht ein Interferenzmuster. (Quelle: blacklightpower.com)

### 3.4 Schrödinger's Katze

Das wohl berühmteste Tierexperiment der Physik ist ein Gedankenexperiment Erwin Schrödingers aus dem Jahre 1935. Er hat hierbei versucht, die Gesetze der Quantenphysik auf makroskopische Objekte anzuwenden um zu zeigen, wie absurd diese Gesetze sind.

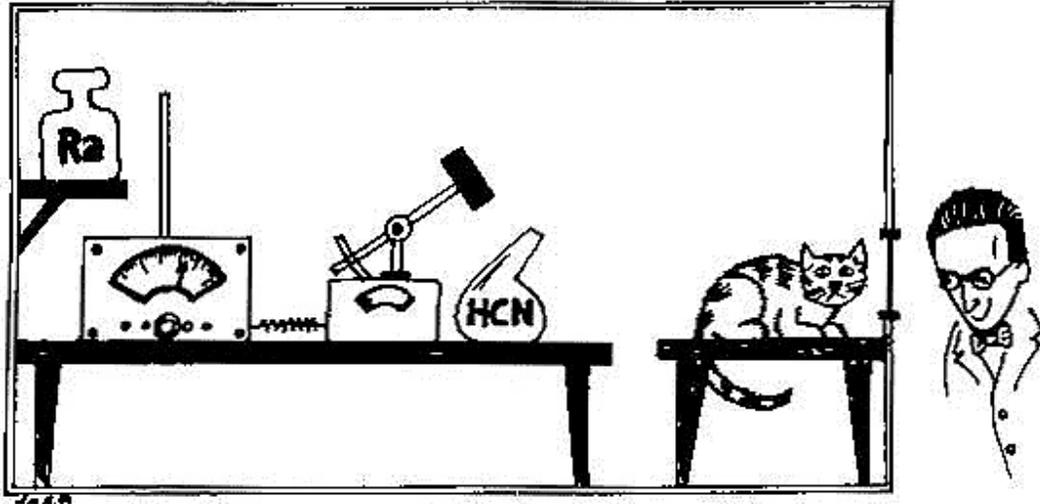


Abbildung 3.2: Gedankenexperiment Schrödinger's Katze. (Quelle: [www.physiologus.de](http://www.physiologus.de))

In einem geschlossenen Kasten befinden sich eine Katze und ein instabiler Atomkern, der innerhalb einer bestimmten Zeit (z.B. Halbwertszeit) mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zerfällt (Abb. 3.2). Der Zerfall wird z.B. mit einem Geigerzähler detektiert, dadurch wird ein Mechanismus aktiviert, der giftiges Gas freisetzt. Die Katze wird durch das Gas getötet. Nach der Halbwertszeit ist der instabile Atomkern mit einer Wahrscheinlichkeit von genau 50% zerfallen, das heißt mit 50% Wahrscheinlichkeit wurde das Giftgas freigesetzt. Zu diesem Zeitpunkt ist die Katze tot und lebendig gleichzeitig, mit gleicher Wahrscheinlichkeit (Zustandsüberlagerung). Erst wenn man den Kasten aufmacht und reinschaut, tritt die eine oder andere Realität ein. Es wird seit damals heftig diskutiert, in wie weit die Zustandsüberlagerung für makroskopische Objekte wie die Katze überhaupt anwendbar ist. Eine elegante Lösung ist die Viel-Welten-Theorie, der zufolge beide Realitäten stattfinden, allerdings in verschiedenen Universen. Auf diese Art entstehen ständig neue, gleichzeitige Realitäten, wir befinden uns lediglich in einer, die aber gleichberechtigt mit den anderen ist.

## 3.5 Tunneleffekt

Der Tunneleffekt spielt unter anderem bei der Kernfusion und dem  $\alpha$ -Zerfall eine Rolle. Er beschreibt, wie es möglich ist, dass bei der Kernfusion ein Proton die abstoßende Coulombkraft des anderen Protons überwinden kann, ohne die dafür eigentlich notwendige Energie zu haben. Im Rahmen der Quantenphysik wird Teilchen nicht eine exakte Energie zugeschrieben, sondern eine Wahrscheinlichkeitsverteilung. Die wahrscheinlichste Energie entspricht dem klassischen Wert. Jedoch hat das Teilchen mit einer, wenn auch kleinen, Wahrscheinlichkeit auch eine größere oder kleinere Energie. Damit besitzt das Teilchen eine gewisse Wahrscheinlichkeit, die Coulombabstoßung (Coulombwall) zu überwinden (durchtunneln), obwohl es klassisch betrachtet zu wenig Energie hat (Abb. 3.3). Im Wellenbild lässt es sich so beschreiben, dass die Wellen vom Coulombwall abgeschwächt werden, aber nicht völlig ausgelöscht, so dass hinter dem Wall immer noch etwas übrig bleibt.

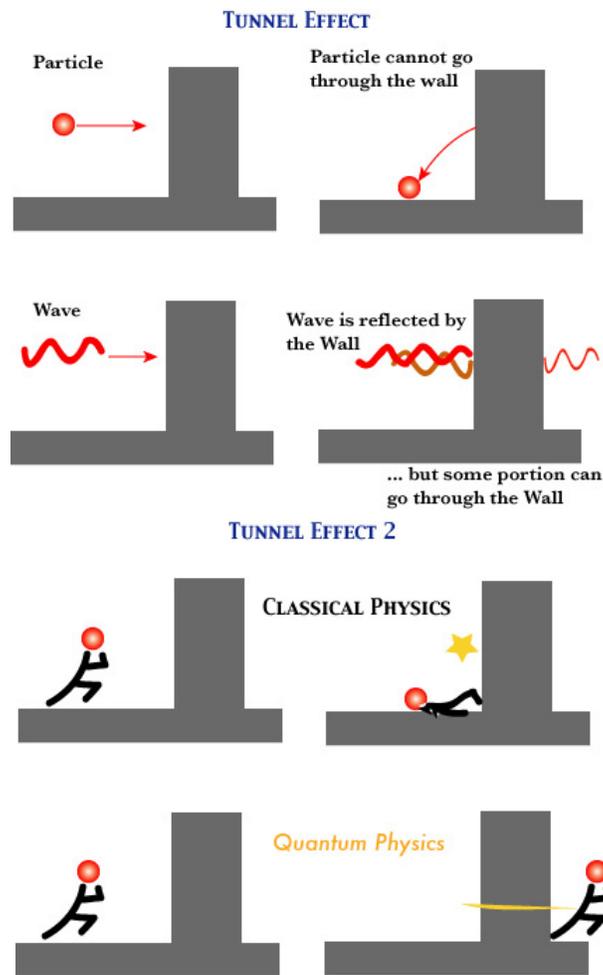
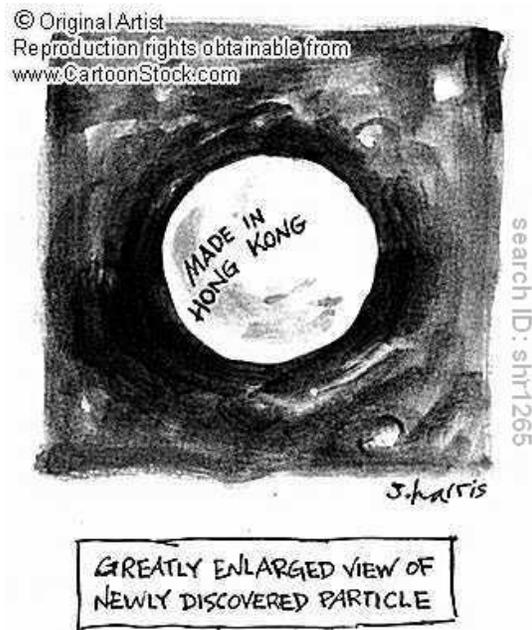


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Tunneleffekts. (Quelle: Kyoto University)



# Kapitel 4

## Teilchenzoo



### 4.1 Literatur zur Vertiefung

- Povh: Teilchen und Kerne
- Fraunfelder: Kernphysik
- Bopp: Kerne, Hadronen und Elementarteilchen

## 4.2 Allgemeines

Der Teilchenzoo (Abb. 4.1) kann unterteilt werden in

- **Leptonen:** Teilchen, die nicht zusammengesetzt sind und auch nicht zum Aufbau weiterer Teilchen dienen.
- **Hadronen:** Teilchen, die zusammengesetzt sind oder zum Aufbau weiterer Teilchen dienen.
- **Eichbosonen:** Teilchen, die die Fundamentalkräfte vermitteln (siehe Kapitel 5).

Zu jeder Teilchensorte gehört ein Antiteilchen. Antiteilchen unterscheiden sich nur durch die entgegengesetzte elektrische Ladung vom Teilchen, ansonsten verhalten sie sich gleich.

## 4.3 Leptonen

- Elektron ( $e^-$ ), Myon ( $\mu^-$ ), Tau ( $\tau^-$ ) und die entsprechenden Antiteilchen Positron ( $e^+$ ), Myon ( $\mu^+$ ) und Tau ( $\tau^+$ ) tragen je eine negative oder positive elektrische Elementarladung, unterscheiden sich jedoch in ihrer Masse (Tau wiegt etwa 3000 mal soviel wie ein Elektron).
- Elektron-Neutrino ( $\nu_e$ ), Myon-Neutrino ( $\nu_\mu$ ) und Tau-Neutrino ( $\nu_\tau$ ) sowie die entsprechenden Antineutrinos tragen keine elektrische Ladung, besitzen nach neuesten Erkenntnissen jedoch eine Masse (Stichwort Superkamiokande-Experiment).
- Leptonen werden in 3 Familien unterteilt: leicht, mittel, schwer
- Leptonen sind elementar, ohne Substruktur

## 4.4 Hadronen

**Quarks** sind die Bausteine der Hadronen:

- Ihre Flavour sind: Up, Down, Charm, Strange, Bottom und Top sowie die entsprechenden Antiquarks.
- Quarks werden in 3 Familien unterteilt: leicht, mittel, schwer.
- Quarks tragen  $2/3$  bzw  $-1/3$  elektr. Elementarladung.
- Quarks treten jeweils in 3 „Farben“ auf: rot, grün, blau sowie in den entsprechenden Antifarben anti-rot, anti-grün und anti-blau ( $\rightarrow$  Farbladung für die starke Wechselwirkung, Kapitel 5.5, nicht als echte Farbe zu verstehen)
- Einführung der Farbladung war notwendig, um die Gültigkeit des Pauli-Prinzip (Teilchen am gleichen Ort unterscheiden sich in mindestens einer Quantenzahl) auch für z.B. das  $\Delta^{++}$  zu gewährleisten
- experimenteller Hinweis auf Farbladung durch Quark-Antiquark-Paarerzeugung mittels Elektron-Positron-Vernichtung: Messung des Wirkungsquerschnitts im Verhältnis zur Myon-Paarbildung. Gibt es 3 Farben, ist die Möglichkeit für  $q\bar{q}$ -Paare 3 mal größer als ohne Farbe.
- Quarks können nicht einzeln auftreten, sondern nur in Gruppen (confinement).

Hadronen werden unterteilt in **Baryonen** und **Mesonen**.

- Baryonen bestehen aus drei Quarks in den Farben r,g,b.
- Mesonen bestehen aus zwei Quarks, nämlich Quark und Antiquark, in den Farbe-Antifarbe-kombinationen rot-antirot, grün-antigrün oder blau-antiblau.
- Baryonen und Mesonen sind somit nach außen farbneutral.
- Beispiele für Mesonen:

$\phi$  ( $s\bar{s}$ ), elektrisch neutral  
 $\pi^+$  ( $u\bar{d}$ ), elektrisch positiv  
 $\pi^-$  ( $\bar{u}d$ ), elektrisch negativ

- Beispiele für Baryonen:

Proton ( $uud$ ), elektrisch geladen  
 Neutron ( $udd$ ), elektrisch neutral

## 4.5 Eigenschaften

Eigenschaften der Bewohner des Teilchenzoos, die zur Charakterisierung der Teilchen dienen, siehe dazu auch Tab. 4.1 und Tab. 4.2:

- Masse
- elektrische Ladung
- Farbladung
- schwache Ladung
- Eigendrehimpuls (Spin) und weitere quantenmechanische Eigenschaften

Tabelle 4.1: Übersicht der drei Quarkfamilien

Name	Up	Down	Charme	Strange	Top	Bottom
Abkürzung	u	d	c	s	t	b
elektr. Ladung	+2/3	-1/3	+2/3	-1/3	+ 2/3	-1/3
Masse MeV/c <sup>2</sup>	1,5-3,3	3,5-6	≈1 270	≈104	≈172 500	≈4 200

Tabelle 4.2: Übersicht der drei Leptonenfamilien

Name	Elektron	Neutrino	Myon	Neutrino	Tau	Neutrino
Abkürzung	e <sup>-</sup>	ν <sub>e</sub>	μ <sup>-</sup>	ν <sub>μ</sub>	τ <sup>-</sup>	ν <sub>τ</sub>
elektr. Ladung	-1	0	-1	0	-1	0
Masse MeV/c <sup>2</sup>	0,511	> 0	105,7	> 0	> 1 784	> 0

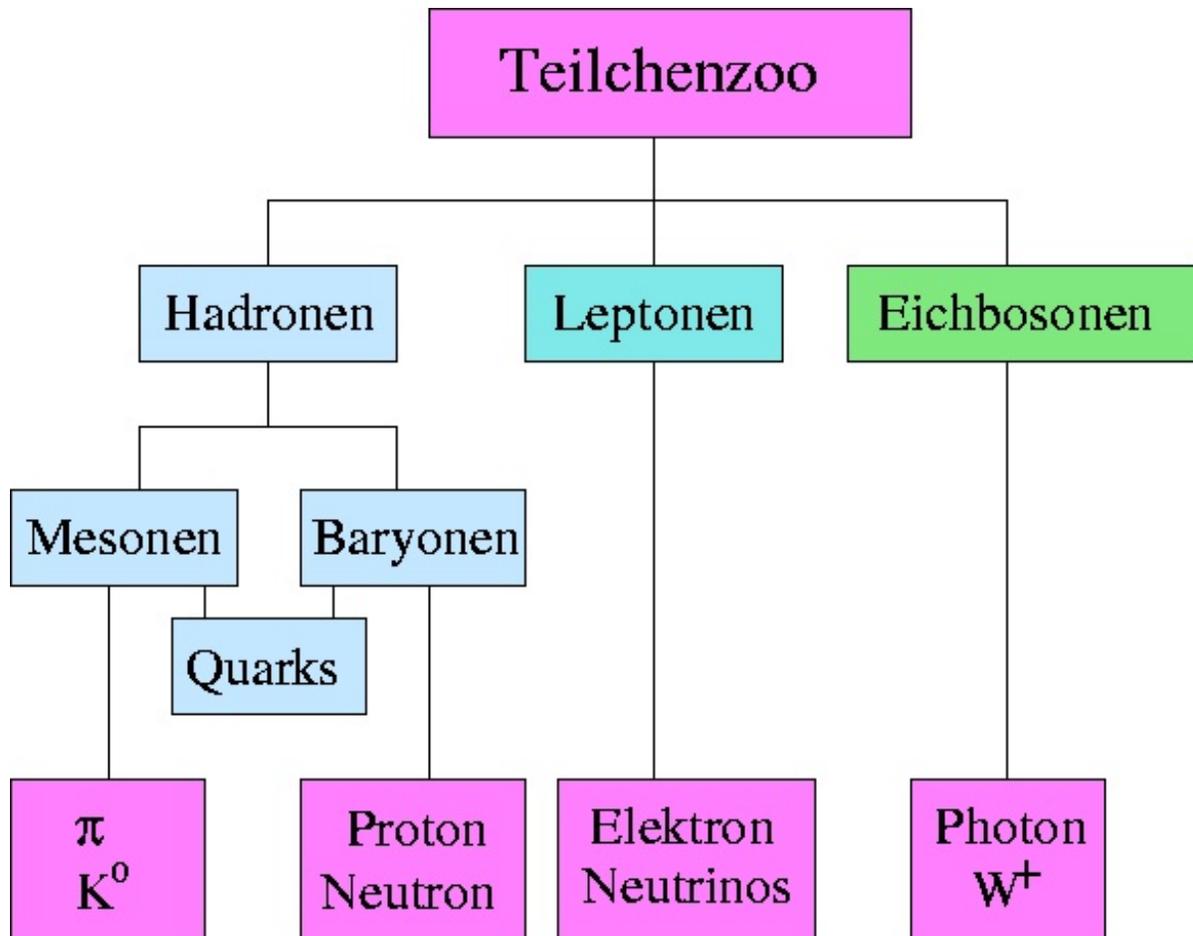


Abbildung 4.1: Zusammenfassender Überblick der Unterteilung des Teilchenzoo im Standardmodell.

## 4.6 Jenseits des Standardmodells

- Teilchen, die aus 5 Quarks bestehen, z.B.  $u u d d \bar{s}$  ( $\Theta^+$ )
- 5-Quark-Zustand oder ein 3+2-Quarkmolekül

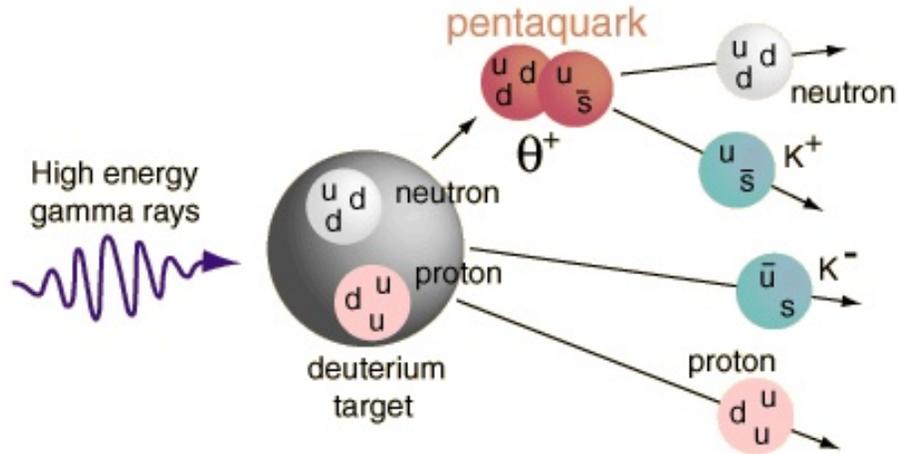


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der Erzeugung eines Pentaquarks. (Quelle: hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)

- Existenz 1997 von D.Diakonov, V.Petrov und M.Polyakov vorgeschlagen, Kollegen sehr skeptisch
- 2003:  $\Theta^+$  von Takashi Nakano (Osaka) entdeckt und von Ken Hicks (Jefferson Lab) bestätigt (Abb. 4.2)
- weitere Gruppen finden ebenfalls Hinweise auf  $\Theta^+$
- CLAS Kollaboration (Jefferson Lab) führt detailliertes und bisher umfangreichstes Experiment durch: keine Hinweise auf Pentaquarks (Nature 2005)
- 2009: Polyakov und Kusnetzov weisen neues Elementarteilchen  $N^*(1685)$  nach
- 2009: T. Nakano finden neue und überzeugende Evidenz für  $\Theta^+$
- Fazit: es ist z.Z. noch unklar, ob Pentaquarks existieren, aber die Hinweise häufen sich.

## 4.7 Offene Fragen des Standardmodells

- Warum lassen sich Leptonen und Quarks jeweils in genau 3 Generationen (leicht, mittel, schwer) einteilen?
- Was ist Masse, wie erhalten Teilchen ihre Masse?
- Gibt es das Higgsboson? Problem: alle Teilchenmassen des Standardmodells sind freie Parameter, sie können nicht aus der Theorie berechnet werden
- Idee: Masse entsteht durch den Higgs-Mechanismus, ursprünglich masselose Elementarteilchen wechselwirken mit dem Higgs-Feld (ihre „Bewegung“ im Higgs-Feld wird gebremst) und gewinnen so Masse (verringern ihre Geschwindigkeit)
- Suche nach dem Higgs-Teilchen am LHC, wird es im erwarteten Energiebereich nicht gefunden: großes Problem...
- Stand Dezember 2012: die beiden LHC-Experimente ATLAS und CMS haben mit großer Signifikanz ( $5\sigma$ ) ein neues Teilchen mit einer Masse von etwa  $126 \text{ GeV}/c^2$  entdeckt. Diese Masse liegt im für das Higgs erwarteten Bereich, die Forscher sind sich sehr sicher, das Higgsboson entdeckt zu haben.
- Wie entstand das extreme Ungleichgewicht zwischen Materie und Antimaterie im Universum?
- Rotationskurven von Galaxien zeigen, dass Galaxien in ihren äußeren Gebieten viel zu schnell rotieren. Die einzige mögliche Erklärung: Galaxien enthalten etwa 10 mal mehr Masse als wir sehen. Bewegung innerhalb von Galaxienhaufen liefert den gleichen Hinweis.
- Kandidaten für diese dunkle Materie: z.B. WIMPs, Axionen, etc (Teilchen jenseits des Standardmodells)
- Neueste Erkenntnisse der Astrophysik (WMAP, Supernovae) zeigen: das Universum besteht zu 4% aus normaler Materie (Standardmodell), zu 23% aus Dunkler Materie (jenseits des Standardmodells, z.B. WIMPs, Axionen, Photinos, Neutralinos,...) und zu 73% aus Dunkler Energie (völlig unklar um was es sich handelt)
- Temperaturkarte des Universums, aufgenommen vom Satelliten WMAP (Abb. 4.3). Hintergrundtemperatur etwa 2.7 K, Schwankung (rot-blau) etwa 0.0001 K
- große Projekte zur Suche nach Dunkler Materie, auch in Tübingen (Prof. Jochum, Projekt CRESST); Problem hierbei: Dunkle Materie wechselwirkt nur gravitativ und schwach (Kap. 5), deshalb extrem schwer zu entdecken

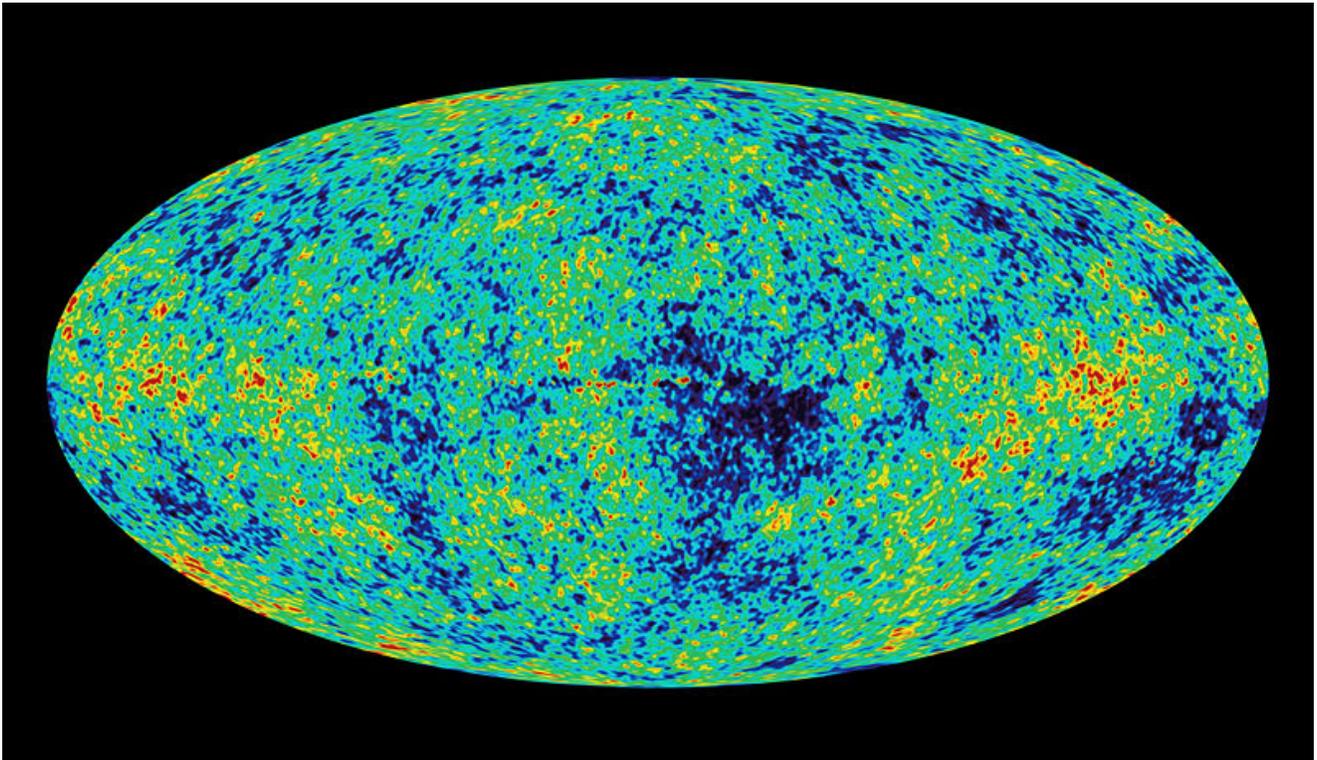


Abbildung 4.3: Mit dem Satelliten WMAP gemessene Verteilung der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung. Auf großen Skalen ist das Universum überall gleich warm (etwa 2.7 K). Die farbig kodierten Schwankungen sind in der Größenordnung  $10^{-4}$  K.

# Kapitel 5

## Fundamentalkräfte



## 5.1 Allgemeines

Unser Kosmos ist bestimmt durch vier Fundamentalkräfte (Tab. 5.1), auf die sich alle Kraftwirkungen zurückführen lassen:

- Gravitation (Schwerkraft) (1666, Newton)
- Elektromagnetische Wechselwirkung (19 Jhd., Faraday, Maxwell)
- Schwache Wechselwirkung (20. Jhd.)
- Starke Wechselwirkung (20. Jhd.)

Diese Kräfte werden durch virtuelle Austauschteilchen, den Eich-Bosonen (siehe Kapitel 2), übertragen. Die virtuellen Teilchen selbst sind nicht messbar, nur ihre Auswirkungen. Sie entsprechen mathemat. Termen in den Theorien, die die Kräfte beschreiben, mit den Eigenschaften bestimmter realer Teilchen.

Jede Kraft hat ihre eigenen Austauschteilchen, die nur zwischen Teilchen wirken können, die die entsprechende Ladung (Masse, elektrisch, schwach oder stark) haben. Beim Austausch der Eich-Bosonen wird scheinbar der Energieerhaltungssatz verletzt, entsprechend der Energie-Zeit-Unschärferelation  $\Delta E \cdot \Delta t \approx h$  ist dies aber für sehr kurze Zeiträume gestattet. Je größer die Masse bzw. Energie des Austauschteilchens ist, desto kürzer ist deshalb die Reichweite der Kraft ( $R \approx \frac{h}{mc}$ ).

Tabelle 5.1: Übersicht der vier Fundamentalkräfte und ihrer Eigenschaften.

Kraft	Boson	Ladung	Reichweite	Stärke
Gravitation	Graviton	Masse	unendlich	$10^{-41}$
elektromagnetisch	Photon	elektrisch	unendlich	1/137
schwach	$W^+$ , $W^-$ , $Z^0$	schwach	$10^{-17}$ m	$10^{-14}$
stark	8 Gluonen	Farbe	$10^{-15}$ m	1 – 10

## 5.2 Gravitation

**Experiment:** Man halte einen Apfel in der ausgestreckten Hand und lasse ihn dann los. Was beobachtet man ?

Auf Grund der Gravitationskraft der Erde fällt der Apfel direkt auf den Boden.

- bestimmt Form und Größe der Strukturen im Universum, die entscheidende Kraft der Astrophysik, aber unbedeutend für die Teilchenphysik
- bindet jede Form von Materie, wenn in hinreichender Menge vorhanden, aneinander (z.B. Planetenwachstum)
- wirkt immer anziehend
- Reichweite (wahrscheinlich) unendlich
- wirkt zwischen Teilchen, die Masse/Energie tragen
- wird übertragen durch das Graviton (noch nicht nachgewiesen)
- beschrieben durch Newtons Gravitationsgesetz

$$F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

und Einsteins allgemeine Relativitätstheorie (ART)

- alternative Beschreibung in der ART: Raumkrümmung (siehe Kap. 6)

### 5.3 Elektro-Magnetische Kraft

**Experiment:** Mit Hilfe eines Kunststoffstabes und eines Katzenfelles werden Ladungen auf ein Elektrometer aufgebracht. Was beobachtet man ?

Das Pendel schlägt auf Grund der Abstoßung gleichnamiger Ladungen aus. Anschließend wird der Vorgang mit einem Porzellanstab wiederholt. Was beobachtet man nun und weshalb ?

- entscheidende Kraft der Atomphysik, bindet Elektron und Atomkern aneinander
- elektrische Ladungen gleicher Art stoßen sich ab, elektrische Ladungen verschiedener Art ziehen sich an

$$F_{\text{em}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} = F_{\text{Coulomb}}$$

- Reichweite unendlich, aber in der Ferne unbedeutend, da sich positive und negative Ladungen in der Ferne kompensieren
- wirkt zwischen Teilchen, die die elektrische Ladung tragen
- wird übertragen durch das Photon (siehe Abb. 5.1)
- die ihr zugrundeliegende Theorie ist die Quantenelektrodynamik QED, sie ist die am besten bestätigste Theorie der Physik

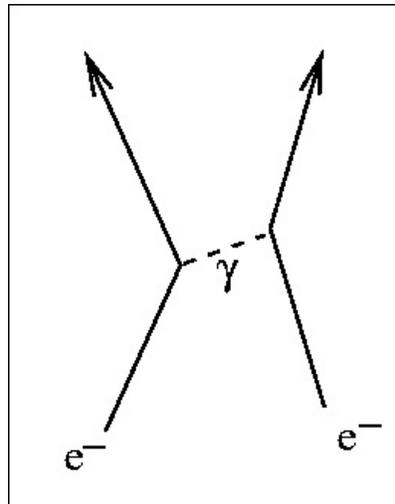


Abbildung 5.1: Elektromagnetische Kraft; Abstoßung zweier Elektronen durch Austausch virtueller Photonen.

## 5.4 Schwache Kraft

- bestimmende Kraft des  $\beta$ -Zerfalls
- einzige Kraft neben der Gravitation, über die das Neutrino wechselwirken kann
- extrem kurze Reichweite von  $10^{-17}$  m (1/100 des Durchmessers eines Protons)
- wirkt zwischen Teilchen, die die schwache Ladung tragen
- wird übertragen durch das  $W^+$ , das  $W^-$  und das  $Z^0$ -Boson, alle drei sind sehr schwer, dies hat die extrem kurze Reichweite zur Folge
- **Beispiel:**  $\beta$ -Zerfall eines Neutrons:  $N \rightarrow P + e^- + \bar{\nu}_e$  (siehe Abb. 5.2)  
Ein Quark ändert seinen Flavor und damit auch seine Ladung, sendet ein  $W^-$ -Boson aus, das sich in ein Elektron und ein Antineutrino verwandelt.

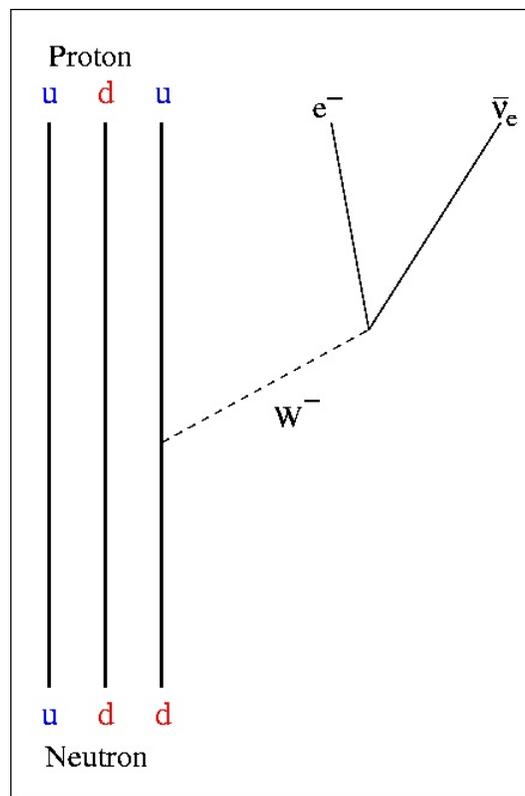


Abbildung 5.2: Schwache Kraft;  $\beta$ -Zerfall eines Neutrons

## 5.5 Starke Kraft

- bindet die Quarks zu Hadronen zusammen, ist die entscheidende Kraft der Kernphysik
- sehr kurze Reichweite von  $10^{-15}$  m
- wirkt zwischen Teilchen, die die Farbladung tragen
- wird übertragen durch die Gluonen, die selbst Träger der Farbladung sind und somit auch miteinander wechselwirken können. Die ihr zugrundeliegende Theorie ist die Quantenchromodynamik QCD
- es gibt insgesamt acht Gluonen, ihre Farbladungen wurden so definiert (andere Definitionen auch denkbar):  $r\bar{g}$ ,  $r\bar{b}$ ,  $g\bar{b}$ ,  $g\bar{r}$ ,  $b\bar{r}$ ,  $b\bar{g}$ ,  $\sqrt{\frac{1}{2}}(\bar{r} - g\bar{g})$ ,  $\sqrt{\frac{1}{6}}(\bar{r} + g\bar{g} - 2b\bar{b})$
- **Beispiel:** Anziehung zweier Quarks (siehe Abb. 5.3)  
Zwei Quarks ziehen sich an, indem sie ständig Gluonen austauschen, die selbst Farbe und Antifarbe tragen. Dabei ändern die Quarks neben Energie und Impuls auch ihre Farbe.

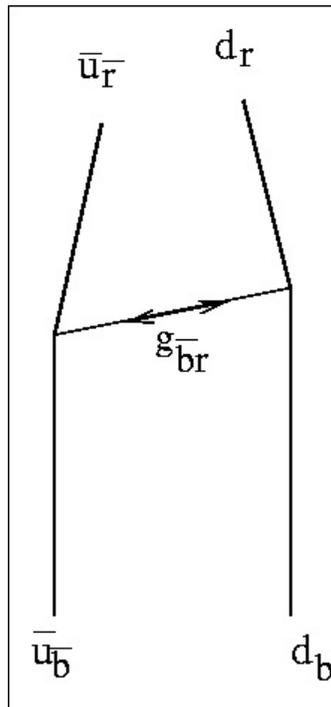


Abbildung 5.3: Starke Kraft; Anziehung zweier Quarks durch Gluonenaustausch.

## 5.6 Vereinheitlichung der Kräfte

Ein Wunschtraum vieler Physiker ist es, alle Fundamentalkräfte auf eine einzige Urkraft zurückzuführen, die mit einer einzigen, umfassenden Theorie („Weltformel“) beschrieben werden kann. Hinweise auf die Existenz einer solchen Urkraft liefert die moderne Kosmologie. Anfang des 20. Jahrhunderts wurde von Edwin Hubble, George LeMaitre, Vesto Slipher und Alexander Friedman die Expansion des Universums entdeckt und damit die Urknalltheorie begründet.

Bei der Entstehung des Universums im Urknall waren gemäß dem Standardmodell der modernen Kosmologie alle Kräfte in einer Superkraft vereinigt (siehe Abb. 5.4). Nach und nach trennten sich die Kräfte auf. Heute ist es möglich, die elektromagnetische und die schwache Kraft in der elektroschwachen Theorie gemeinsam zu beschreiben. Es gibt Ansätze, auch die starke Kraft mit einzubeziehen (Grand Unified Theory, GUT). Es gelang jedoch noch nicht, auch die Gravitation zu berücksichtigen (Quantentheorie der Gravitation, TOE). Generell sind diese Vereinheitlichungen (noch) nicht experimentell zugänglich, da hierfür extrem hohe Energien notwendig sind.

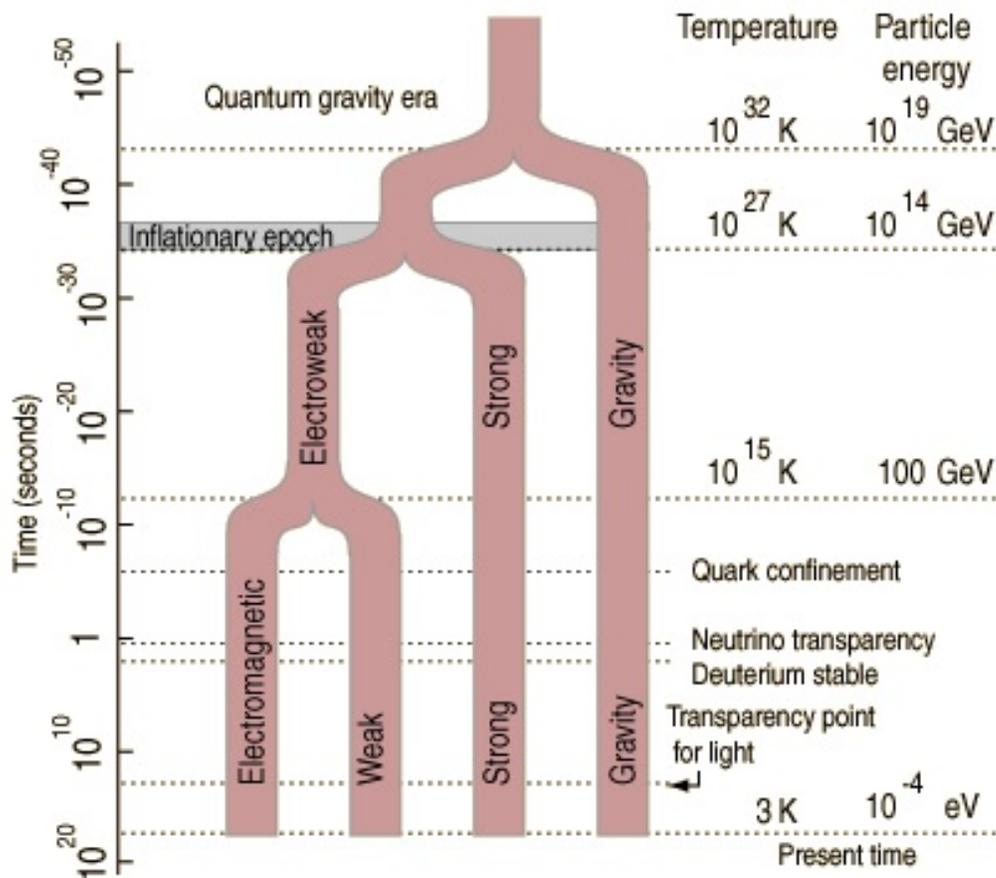


Abbildung 5.4: Vereinheitlichung der vier Fundamentalkräfte.

### 5.6.1 Die Anfänge des Urknallmodells

Im Jahre 1917:

- Albert Einstein sieht das Universum als statisch an, hat deshalb den kosmologischen Parameter  $\Lambda$  in seine Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie ART eingeführt.
- Willem de Sitter spricht ebenfalls von einem ruhenden Universum, er erklärt die Rotverschiebung von Spektrallinien in sog. Spiralnebeln (heutzutage wissen wir es sind weit entfernte Galaxien) damit, dass die Zeit mit zunehmender Entfernung langsamer abläuft.
- Vesto Slipher vermisst seit 1912 am Lowell Observatorium die Spektren von Spiralnebeln hinsichtlich Wellenlängenverschiebung. Bis 1924 findet er 37 Spiralnebel mit rotverschobenen und 4 mit blauverschobenen Spektren. Die Ursache war ihm unklar: Dopplereffekt? DeSitter Zeit?

Die 1920er Jahre:

- Die Natur der Spiralnebel war unbekannt, Carl Wirtz sucht z.B. einen Zusammenhang zwischen der von Slipher gefundenen Rotverschiebung und den Ideen von de Sitter. Das Hauptproblem war die unbekannte Entfernung der Spiralnebel.
- Alexander Friedmann entdeckt 1922, dass das Universum gemäß der ART expandieren und kontrahieren kann. Er stellt jedoch keine Verbindung zu Beobachtungsdaten an. Bis ins Jahr 1929 wird seine Arbeit nicht zur Kenntnis genommen.
- Edwin Hubble entdeckt, dass M31 und andere Spiralnebel weit entfernte Galaxien wie unsere eigene Milchstraße sind. Er verwendet hierbei die von Henrietta Leavitt 1912 entdeckte Perioden-Leuchtkraft-Beziehung der Cepheiden (besonderer Typ veränderlicher Sterne, die auch in anderen Galaxien gefunden werden können). Dadurch kann Hubble aus der beobachteten Periode der Helligkeitsschwankung direkt auf die echte Helligkeit des Sterns schließen und diese mit der beobachteten Helligkeit vergleichen. Der Unterschied ist im wesentlichen ein Maß für die Entfernung (je weiter weg desto dunkler erscheint uns ein Stern). Bis 1926 hat Hubble etwa 400 Galaxien untersucht und ihre Entfernungen bestimmt.
- Georges LeMaître (Ingenieur, Mathematiker, Physiker und Priester) zeigt 1925 eine Inkonsistenz in de Sitters Modell, es verstößt gegen die Homogenität, er korrigiert das Modell. 1927 entwickelt LeMaître ein Modell, das über Einstein-de Sitter hinausgeht: ein dynamisches Modell der ART. Der Krümmungsradius des Universums vergrößert sich mit der Zeit  $\rightarrow$  Expansion des Universums. Diese Expansion führt zu einer Rotverschiebung der Spektrallinien, die sich mit zunehmender Entfernung vergrößert. Er beschreibt dies mit dem Gesetz  $v = H \cdot r$ , wobei  $v$  die aus der Rotverschiebung jeweils abgeleitete Geschwindigkeit,  $r$  die Entfernung und  $H$  die heute so genannte Hubble-Konstante sind. Dies ist das 1927 von Georges LeMaître hergeleitete Hubble-Gesetz, das unabhängig von ihm auch Edwin Hubble gefunden hat.
- Im Gegensatz zu Hubble betont LeMaître, dass die bei Galaxien beobachtete Rotverschiebung die Expansion des Universums zeigt. Er publiziert seine Erkenntnisse 1927 in den französischsprachigen Annales de la societe scientifique de Bruxelles, seine Arbeit findet jedoch keinerlei Beachtung.

- Im Jahr 1929 stellt sich Edwin Hubble die Frage, ob die extragalaktischen Nebel einen Hintergrund bilden, vor dem sich unsere Sonne bewegt. Er verwendet für seine Untersuchung dieselben Daten wie LeMaître, ergänzt durch Daten von Humason. Hubble kannte jedoch LeMaîtres Arbeit nicht. Hubble findet eine lineare Beziehung zwischen der beobachteten Rotverschiebung und der Distanz der Galaxien:  $v = H \cdot r$  Für die Konstante findet er  $H \approx 500 \text{ km/s/Mpc}$ . Er interpretiert seine Ergebnisse so:
  - noch zu wenig Daten für eine endgültige Schlussfolgerung
  - vermutlich lässt sich Bewegung der Galaxien zeigen
  - bemerkenswertestes Ergebnis sei die Bestätigung des de Sitter-Universums (statisch!)

Hubble sagt nichts über eine Expansion des Universums, er will lediglich als Entdecker der Beziehung  $v = H \cdot r$  gelten. Heutzutage wird fälschlicherweise leider meist Edwin Hubble als der Entdecker der Expansion des Universums bezeichnet.

Am 10. Januar 1930 hält Willem de Sitter einen Vortrag bei der Royal Astronomical Society. Es kommt zu einer angeregten Diskussion zwischen de Sitter und Eddington über Hubbles Entdeckung. Das Sitzungsprotokoll wird im Februar 1930 veröffentlicht, LeMaître liest es und schickt Eddington und de Sitter Kopien seiner Arbeit. Beide erkennen, dass LeMaître der Durchbruch gelungen ist, preisen seine Arbeit an und machen sie publik. Sie wird zum Teil ins englische übersetzt, jedoch erstaunlicherweise ohne die Beziehung  $v = H \cdot r$ .

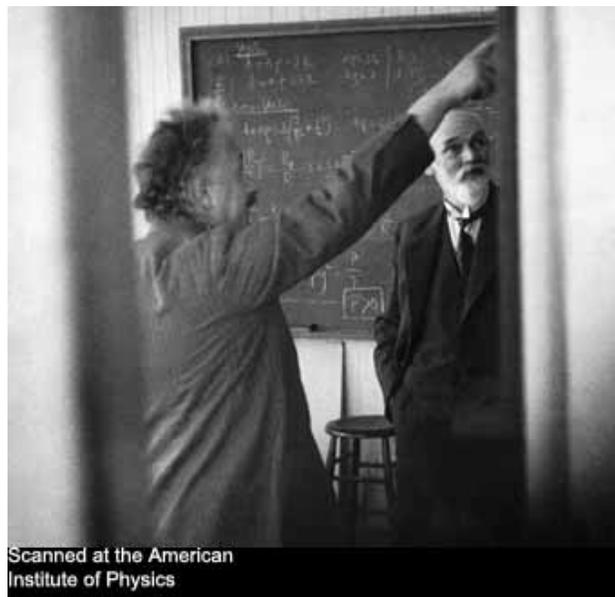


Abbildung 5.5: Albert Einstein und Willem de Sitter

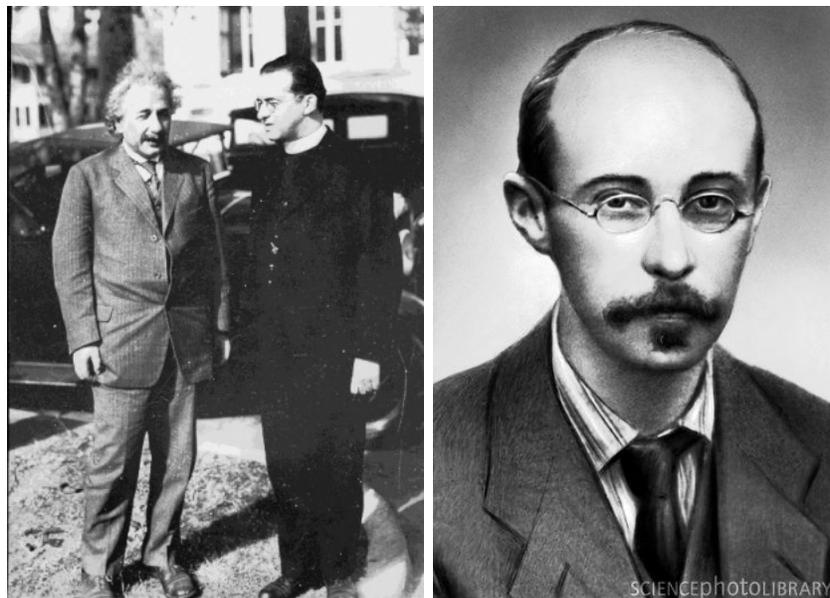


Abbildung 5.6: links: Albert Einstein und Georges LeMaître; rechts: Alexander Friedman

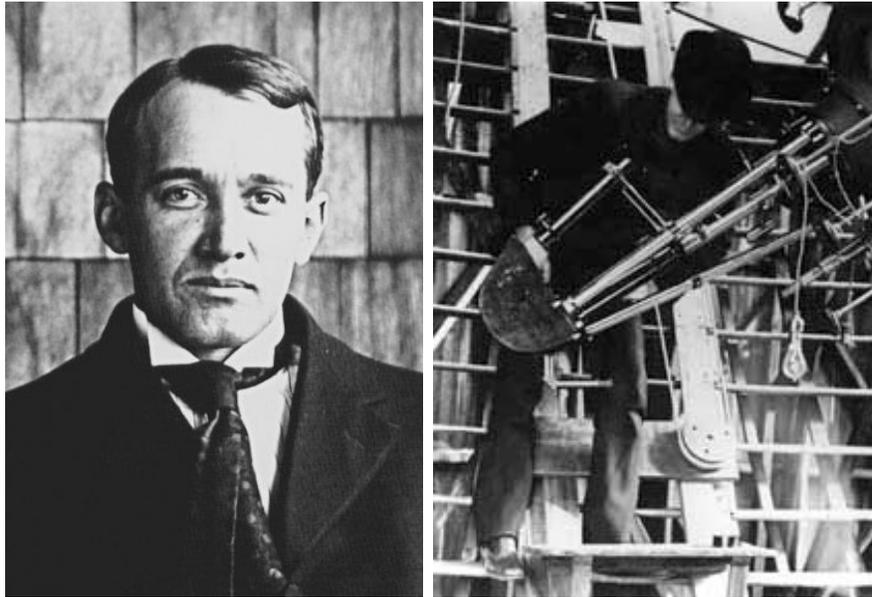


Abbildung 5.7: Vesto Slipher

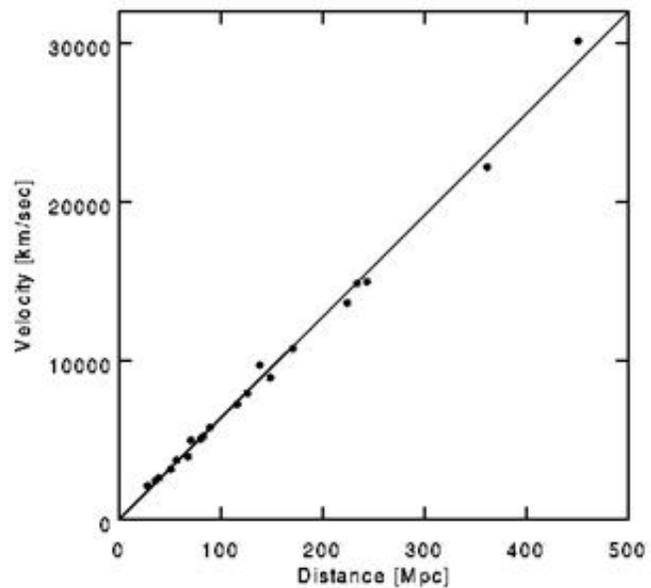


Abbildung 5.8: links: Edwin Hubble; rechts: Die von Hubble und LeMaître entdeckte Beziehung zwischen Fluchtgeschwindigkeit (Rotverschiebung) und Entfernung

### 5.6.2 Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung

Glashow, Salam, Weinberg entwickeln 1969 die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung

- vorausgesagtes 4. Quark ( $c$ ) wurde 1973 entdeckt
- Voraussagen bzgl. der Massen von  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$  wurden 1983 experimentell bestätigt
- unterschiedliche Stärke der schwachen und elektromagnetischen Kraft beruht auf den unterschiedlichen Massen ihrer Austauscheteilchen, bei sehr hohen Energien sind beide Kräfte gleich stark
- bei hohen Energien sind  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$  masselos wie das Photon, unterhalb einer bestimmten Energie wird ihre Masse durch Higgs-Felder erzeugt
- es gibt 4 Higgs-Felder, bei Abkühlung werden von  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$  je ein Higgs-Boson absorbiert,  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$  erhalten so Masse
- Photon ist masselos, also muss es ein freies Higgs-Boson geben ( $\rightarrow$  LHC)

### 5.6.3 Grand Unified Theories (GUTs)

Zusammenführung von elektroschwacher und starker Kraft, Voraussagen:

- Quarks und Leptonen können ineinander umgewandelt werden
- das freie Proton ist instabil (experimentell gesicherte Lebensdauer etwa  $10^{33}$  Jahre)
- Neutrinos haben Masse
- es gibt massive magnetische Monopole

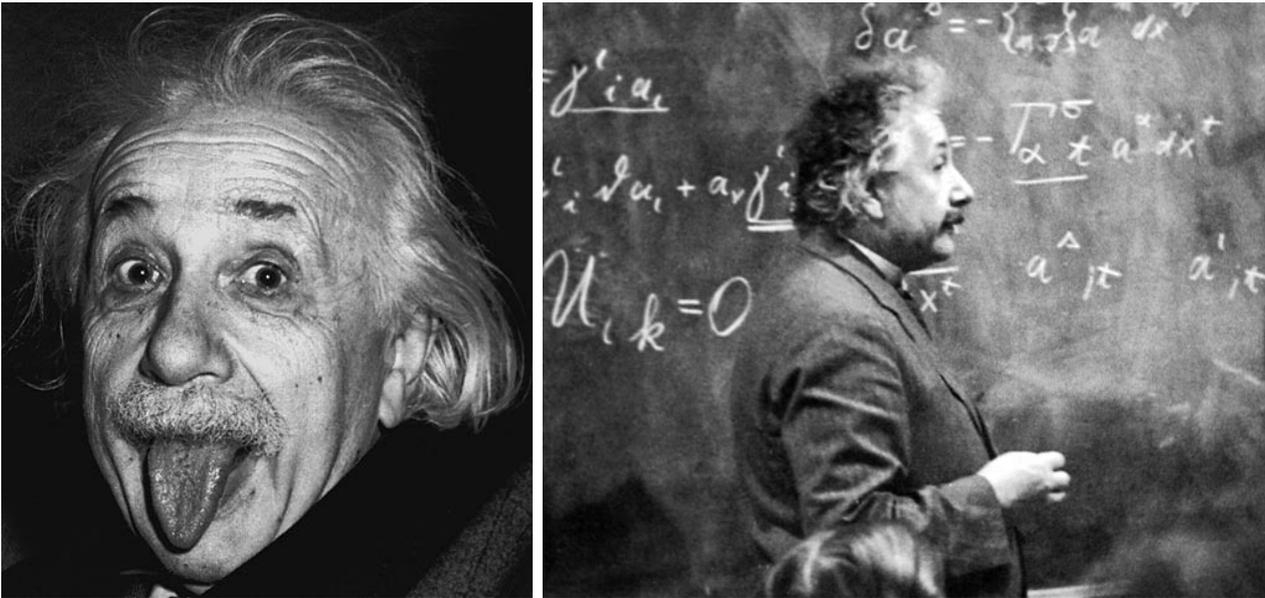
### 5.6.4 Theories Of Everything (TOE)

gemeinsame Beschreibung von elektroschwacher Kraft, starker Kraft und Gravitation

- Superstringtheorien, 10 Dimensionen, 6 eingerollt
- Leptonen und Quarks sind nicht punktförmig, sondern Fäden, deren Abmessung zur Zeit nicht messbar ist (Plancklänge,  $10^{-35}$  m)
- alles sehr spekulativ...

# Kapitel 6

## Einsteins Relativitätstheorie



### 6.1 Literatur zur Vertiefung

- A. Einstein: Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie
- U. Schröder: Spezielle Relativitätstheorie
- H. und M. Ruder: Die Spezielle Relativitätstheorie
- H. Goenner: Einführung in die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie

## 6.2 Allgemeines

- 1905 wird von Albert Einstein die Spezielle Relativitätstheorie (SRT) veröffentlicht: „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Annalen der Physik und Chemie, 17/1905, S. 891-921)
- Vorarbeiten u.a. von H. A. Lorentz.
- 1917 erweitert zur Allgemeinen Relativitätstheorie (ART).
- SRT ist eine der experimentell am besten gesicherten Theorien.
- SRT und ART liefern ein neues Konzept für Raum und Zeit.

## 6.3 Postulate der Speziellen Relativitätstheorie

Die spezielle Relativitätstheorie beruht auf 2 Postulaten, die nicht logisch begründet, sondern nur experimentell bestätigt werden können.

1. *(Spezielles) Relativitätsprinzip:*

Die physikalischen Gesetze haben in allen gleichförmig bewegten, gravitationsfreien Bezugssystemen (Inertialsystem) die gleiche Form. Jede Geschwindigkeit ist immer nur Relativgeschwindigkeit, es ist unmöglich, eine absolute Geschwindigkeit anzugeben.

2. *Konstanz der Lichtgeschwindigkeit:*

Die Vakuumlichtgeschwindigkeit (299 792,458 km/s) hat in jedem Inertialsystem denselben Wert, sie ist vom Bewegungszustand der Quelle oder des Beobachters unabhängig.

Beachte: Voraussetzung für die Gültigkeit der speziellen Relativitätstheorie ist die Abwesenheit von Gravitationskräften.

## 6.4 Das Myonenschauer-Experiment

Myonen entstehen beim Eintreten von kosmischer Strahlung (vor allem Protonen und  $\alpha$ -Teilchen) in die Erdatmosphäre in etwa 10 km Höhe. Sie bewegen sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit zur Erde hin. Ihre mittlere Lebensdauer  $\tau$  beträgt  $2,2 \mu\text{s}$ . 1941 wurde von Rossi und Hall die Anzahl dieser Myonen, die eine Geschwindigkeit von  $0,9952 c$  haben, auf dem Mt. Washington (1910 m) und auf nahezu Meereshöhe (3 m) gemessen. Auf dem Berg ergaben sich  $563 \pm 10$  Myonen pro Stunde, auf Meereshöhe  $408 \pm 9$  Myonen pro Stunde. Die Flugzeit der Myonen von der Bergspitze bis zum Erdboden beträgt  $6,4 \mu\text{s}$ . Entsprechend dem Zerfallsgesetz

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

(mit Ausgangsmenge  $N_0$  und Zerfallskonstante  $\lambda$ , für die mittlere Lebensdauer  $\tau$  gilt  $\tau = \frac{1}{\lambda}$ ) sollten deshalb auf dem Boden nur

$$N(6,4 \mu\text{s}) = 563 e^{-6,4/2,2} = 31$$

Myonen pro Stunde gezählt werden.

Mit Hilfe der speziellen Relativitätstheorie lässt sich dieses Problem lösen:

1. *Zeitdilatation*: Bewegte Uhren gehen langsamer im Vergleich zur Uhr in Ruhe („Zeitspanne“ des tick-tack). Für den Beobachter auf der Erde läuft die Uhr des mit  $0,9952 c$  fliegenden Myons etwa 10 mal langsamer ab, entsprechend sollten auch weniger Myonen zerfallen.
2. *Lorentzkontraktion*: Bewegte Maßstäbe sind in Bewegungsrichtung verkürzt. Das Myon befindet sich in seinem eigenen Bezugssystem in Ruhe, es sieht den Erdboden dagegen mit  $0,9952 c$  auf sich zukommen. Entsprechend der Lorentzkontraktion erscheint dem Myon die Strecke bis zum Erdboden um etwa den Faktor 10 verkürzt, so dass der Erdboden problemlos bis zu ihm fliegen kann, bevor es zerfällt.

**Fazit:** Die beobachtete Anzahl der schnellen Myonen lässt sich nur mit Hilfe der speziellen Relativitätstheorie verstehen.

## 6.5 Zeitdilatation

### 6.5.1 Flug mit Uhren

1971 flogen Hafele und Keating mit transportablen Caesium-Atomuhren um die Erde, um den Effekt der Zeitdilatation zu messen. Die Geschwindigkeit des Flugzeugs ist zwar sehr klein (1 000 km/h) im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit (300 000 km/s), dennoch kann die Zeitdilatation nachgewiesen werden. Die um die Erde geflogenen Uhren gingen etwa 50 ns (50 Milliardstel Sekunden) nach im Vergleich zu baugleichen, beim Start synchronisierten Uhren auf der Erde. Die Ergebnisse werden allerdings kontrovers diskutiert, da man zusätzliche Effekte berücksichtigen muss.

**Fazit:** Wer viel fliegt, altert langsamer...

### 6.5.2 Das Zwillingsparadoxon

Ein Zwillingpaar lebt an einem Ort, der sich geradlinig gleichförmig bewegt (Erde). Die Schwester (blau) unternimmt einen längeren Raumflug mit der Geschwindigkeit  $v$ , der Bruder (rot) bleibt zuhause (Abb. 6.1). Bei der Rückkehr der Schwester zeigen ihre Uhren verschiedene Zeiten an (u.U. sind für die Schwester Wochen, für den Bruder Jahrzehnte vergangen).

Zwischen A und M vergeht im Inertialsystem des Bruders die Zeit  $T/2$ , im Inertialsystem der Schwester  $T'/2$ . Die Zeitdilatation liefert dann

$$T = T' \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-0.5}$$

*Gegenargument:*

Betrachtung vom Standpunkt des Ruhesystems der Schwester würde zum genauen Gegenteil führen. Wie lässt sich dieses Paradoxon lösen ?

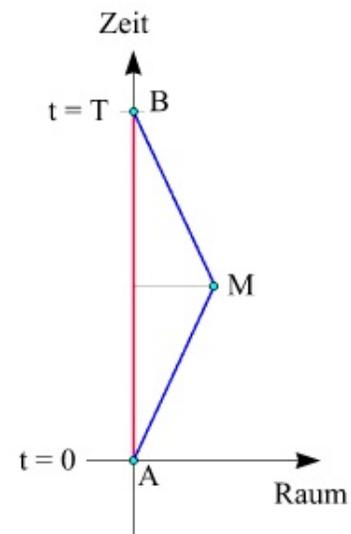


Abbildung 6.1: Raum-Zeit-Diagramm für Bruder (rot) und Schwester (blau).

*Lösung des vermeintlichen Paradoxon:*

Die Schwester bewegt sich nicht gleichförmig, sie wechselt ihr Inertialsystem (Rückkehr zum Ausgangspunkt). Die Bewegung von Bruder und Schwester sind deshalb nicht äquivalent. Alle Ereignisse auf den diagonalen Linien in Abb. 6.2 finden für die Schwester jeweils gleichzeitig statt. Es gibt aber einen Bereich von Ereignissen im Leben des Bruders, die die Schwester in keinem ihrer beiden Inertialsysteme als jetzt bezeichnen würde. Dieser Bereich ist dick schwarz markiert.

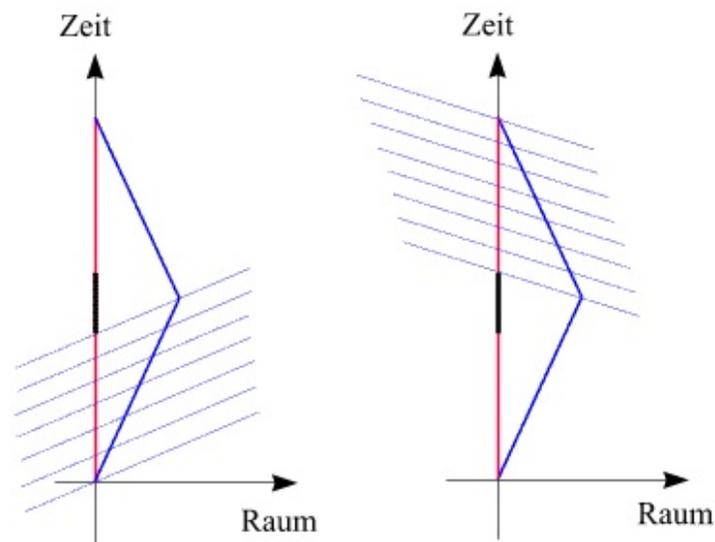


Abbildung 6.2: Gleichzeitigkeit für Bruder und Schwester ist nur im schraffierten Bereich möglich.

## 6.6 Formelsammlung Spezielle Relativitätstheorie

- Zeitdilatation

Bewegte Uhren gehen langsamer, d.h. es vergeht mehr Zeit im Ruhssystem:

$$t_{\text{ruh}} = \frac{t_{\text{bew}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- Längenkontraktion

Maßstäbe sind in Bewegungsrichtung verkürzt:

$$l_{\text{bew}} = l_{\text{ruh}} \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

- Massenzunahme

Je schneller, desto schwerer:

$$m_{\text{bew}} = \frac{m_{\text{ruh}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- Additionstheorem für zwei Geschwindigkeiten  $v_1$  und  $v_2$ :

$$v_{\text{real}} = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 \cdot v_2}{c^2}}$$

## 6.7 Die allgemeine Relativitätstheorie

Rund 10 Jahre nach der speziellen legt A. Einstein die allgemeine Relativitätstheorie (ART) vor. Die Idee hierbei ist die Verallgemeinerung des Relativitätsprinzips der speziellen Relativitätstheorie auf alle, also auch beschleunigte Systeme. Die ART beschreibt die Gravitation (Schwerkraft) umfassender als die Newtonsche Gravitationstheorie, die als Grenzfall für geringe Geschwindigkeiten angesehen werden kann. Eine Reihe von Voraussagen der ART sind inzwischen durch Beobachtungen oder Experimente bestätigt.

### 6.7.1 Gleichheit von schwerer und träger Masse

- *Schwere Masse:* Alle Körper fallen unabhängig vom Material im Schwerfeld der Erde gleich. Hierfür ist die Eigenschaft „schwere Masse“ verantwortlich, die jeder Körper besitzt. Es gilt  $F = m_s \cdot g$
- *Träge Masse:* Soll der Bewegungszustand eines Körpers geändert werden, so muss zu seiner Beschleunigung Kraft aufgewendet werden, um seine „träge Masse“ zu überwinden. Es gilt  $F = m_t \cdot a$

Lange Zeit war unklar, ob ein Unterschied zwischen beiden besteht und wie groß dieser ist. Einsteins geniale Erkenntnis: Träge und schwere Masse sind identisch, es gibt keine physikalische Möglichkeit zu unterscheiden, ob ein Schwerfeld oder eine Trägheitsbewegung vorliegt (Abb. 6.3).

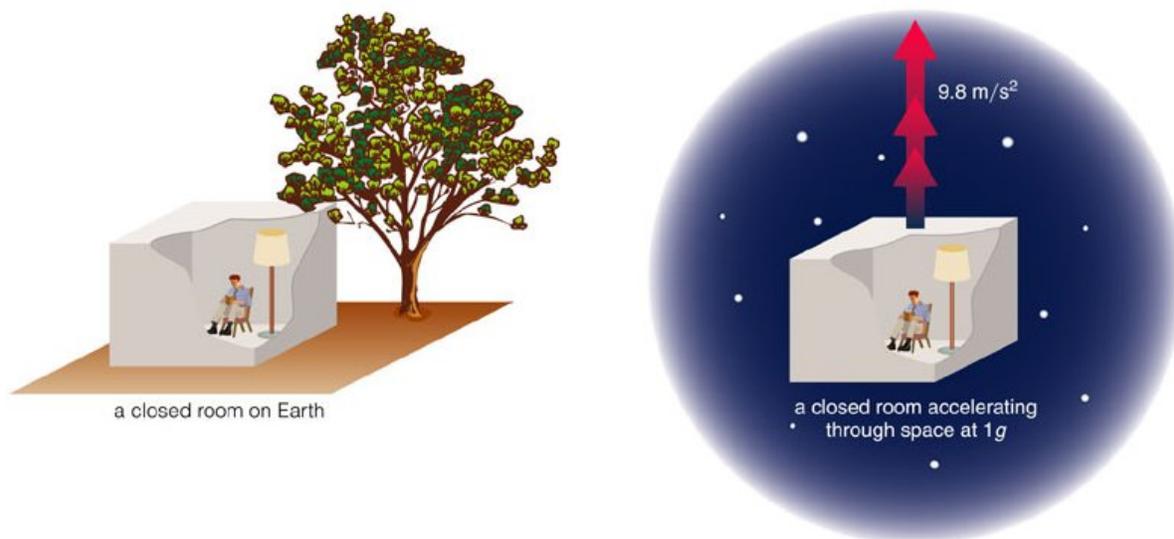


Abbildung 6.3: Träge und schwere Masse sind identisch (Quelle: Pearson Education)

### 6.7.2 Die Drehung des Merkur-Perihels

Gemäß den Keplerschen Gesetzen bewegen sich die Planeten auf Ellipsenbahnen um die Sonne. Berücksichtigt man die störenden Einflüsse der anderen Planeten auf die Bewegung eines einzelnen Planeten, so wandert die Ellipse um die Sonne, es kommt zu einer Rosettenbewegung (Periheldrehung, entdeckt 1859 von Le Verrier, siehe Abb. 6.4). Die Newtonsche Gravitationstheorie kann trotz Einbeziehung sämtlicher Störeffekte die bei Merkur gemessene Periheldrehung nicht erklären, der gemessene Wert ist um 43,11 Bogensekunden größer als die Theorie erlaubt. Die allgemeine Relativitätstheorie liefert für den Überschuss 43,03 Bogensekunden pro Jahrhundert, indem sie die Raumkrümmung, verursacht durch die Masse der Sonne, berücksichtigt. Dieser Wert stimmt nahezu perfekt mit der Beobachtung überein.

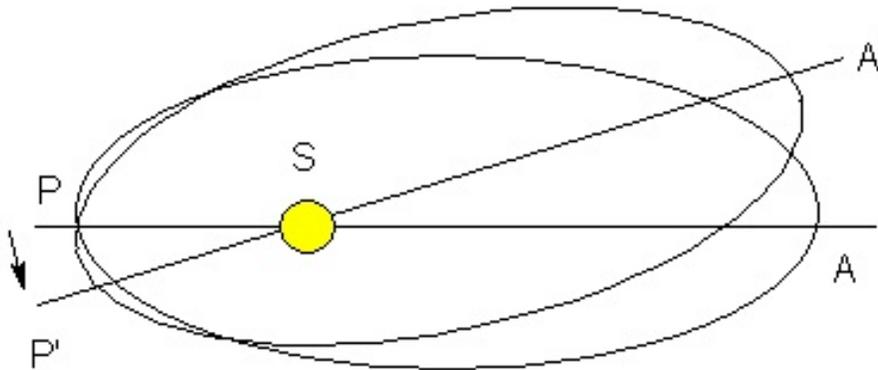


Abbildung 6.4: Schematische Darstellung der Periheldrehung.

### 6.7.3 Die Krümmung der Raumzeit

*Materie sagt der Raumzeit, wie sie sich zu krümmen hat, die gekrümmte Raumzeit sagt der Materie, wie sie sich zu bewegen hat.*

- Anschaulich:

Auf ein straff gespanntes Gummituch („Raumzeit“) werden schwere Gegenstände gelegt („Materie“). Nun rollt eine Murmel über das Tuch, sie folgt der Mulde. Dieser Effekt ist messbar bei der durch die Sonne verursachten Ablenkung des Lichts eines Sterns (Abb. 6.5). 1919 wurde dies das erste Mal bei einer Sonnenfinsternis gemessen, der Wert entsprach genau dem durch die ART vorausgesagten Wert von 2 Bogensekunden.

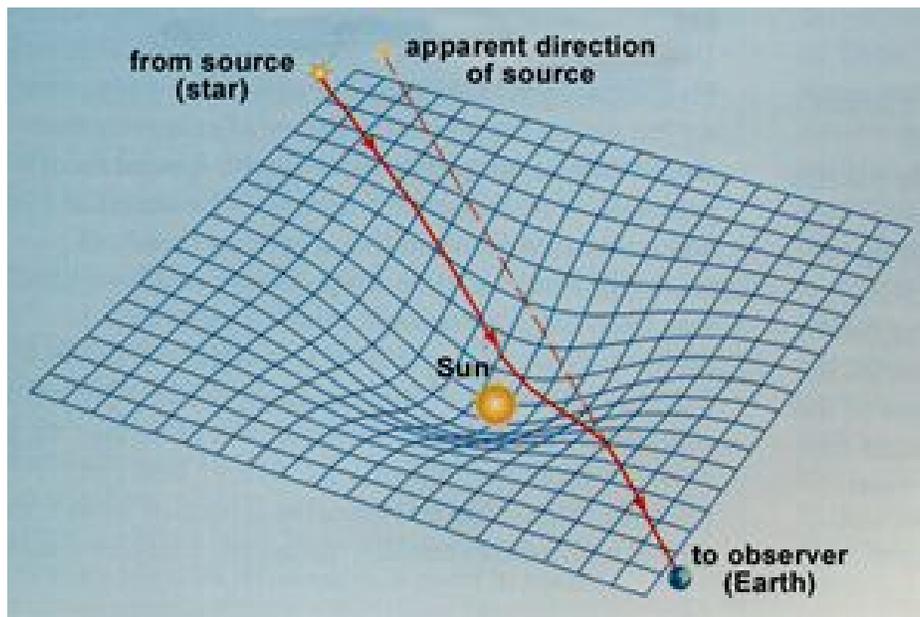


Abbildung 6.5: Schematische Darstellung der Raumkrümmung.

- Für das Global Positioning System GPS sind Korrekturen basierend auf SRT und ART unerlässlich. Der Einfluss der relativistischen Effekte auf die Uhren an Bord der GPS Satelliten führt bereits innerhalb einer Woche zu Ungenauigkeiten von etwa 80 km, wenn diese Effekte nicht berücksichtigt werden.

## 6.8 Visualisierung relativistischer Effekte

Objekte, die sich mit annähernd Lichtgeschwindigkeit bewegen, erscheinen dem menschlichen Auge nicht unbedingt so, wie es die Gleichungen der SRT erwarten lassen. Entscheidend sind die endliche, konstante Lichtgeschwindigkeit und der Dopplereffekt. Eine sehr gute Webseite des Instituts für Astronomie und Astrophysik, Abt. Theoretische Astrophysik, zum Thema ist: [www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de](http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de)

Sehen eines Gegenstands bedeutet das gleichzeitige Eintreffen von Photonen im Auge. Bei einem ausgedehnten Gegenstand (mehr als ein Punkt) heißt das nicht automatisch, dass die Photonen auch alle gleichzeitig am Gegenstand gestartet sind. Ein senkrecht zur Bewegungsrichtung ausgedehnter Stab, der sich mit beinahe Lichtgeschwindigkeit bewegt, erscheint deshalb gekrümmt (Hyperbel), ebenso eine Fläche (Hyperboloid), siehe hierzu Abb. 6.6

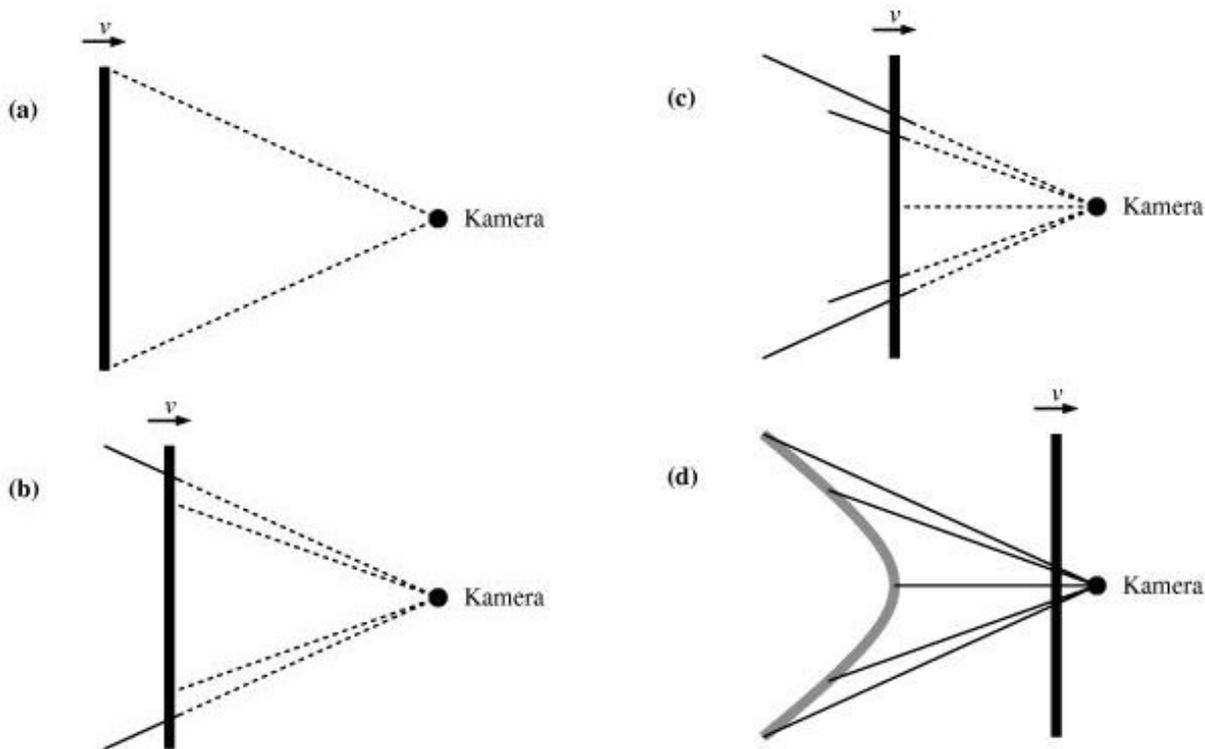


Abbildung 6.6: Visualisierung relativistischer Effekte.

Aufgrund des Dopplereffekts wird bei einem Objekt, das sich nähert, die Strahlung zu kürzeren Wellenlängen hin (blau) verschoben, entfernt es sich, zu längeren Wellenlängen hin (rot). Man kann sich dies anschaulich als Stauchung bzw. Dehnung der Lichtwellen vorstellen analog zum Dopplereffekt beim Schall. Bei relativistischen Geschwindigkeiten führt der Dopplereffekt zu einer deutlichen Farbänderung der sich bewegenden Objekte, dargestellt in Abb. 6.7.

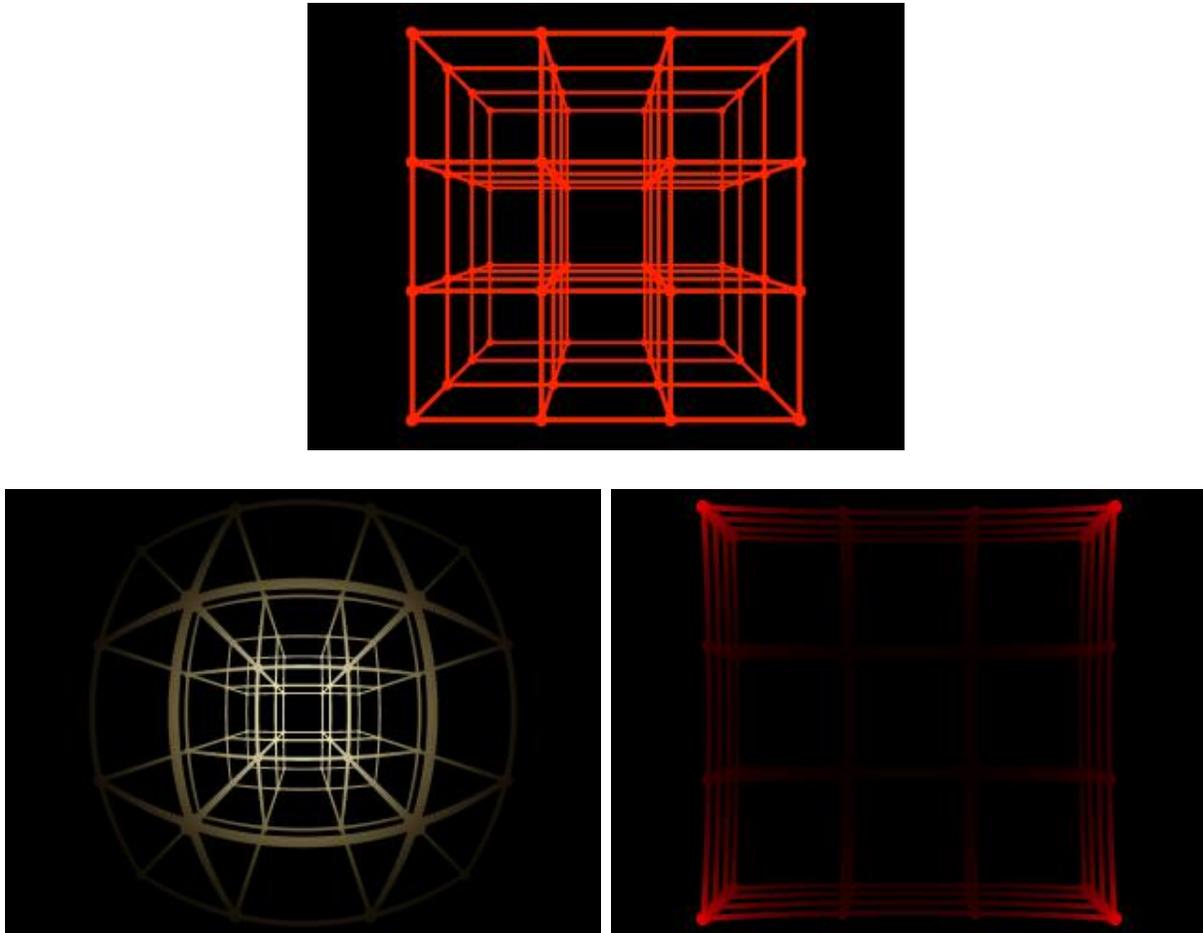


Abbildung 6.7: Visualisierung zum Dopplereffekt. Oben ein ruhendes Gitter, unten links bewegt sich dasselbe Gitter mit  $0.9c$  auf den Beobachter zu, rechts mit  $0.9c$  vom Beobachter weg.



# Kapitel 7

## Supraleitung

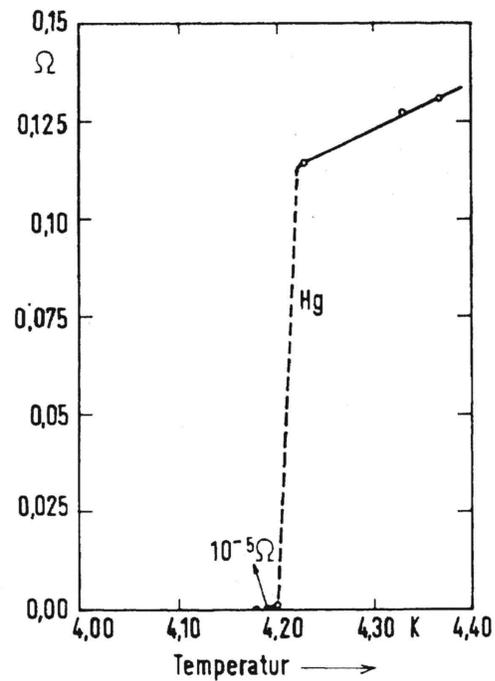


Abbildung 7.1: H. K. Onnes und der von ihm beobachtete Sprung des elektrischen Widerstands beim Quecksilber (Quelle: [www-solidstate.physik.uni-bremen.de](http://www-solidstate.physik.uni-bremen.de)).

### 7.1 Literatur zur Vertiefung

- Buckel, Kleiner: Supraleitung

## 7.2 Die Entdeckung

- 1908 gelang es Heike Kamerlingh Onnes, Helium als letztes der Edelgase zu verflüssigen. Dadurch waren Temperaturen von 1 K-10 K erreichbar. 1913 erhielt er den Nobelpreis für Physik.
- Onnes untersuchte den elektrischen Widerstand der Metalle in Abhängigkeit von der Temperatur. Das Wissen über den elektrischen Leitungsmechanismus und die Temperaturabhängigkeit des Widerstands war zu dieser Zeit noch sehr lückenhaft. Es gab drei Theorien zum Verhalten des Widerstands bei sehr tiefen Temperaturen:
  1. Widerstand geht mit sinkender Temperatur stetig gegen Null (Onnes, Dewar)
  2. Widerstand geht mit sinkender Temperatur gegen festen Grenzwert (Matthiessen)
  3. Widerstand geht durch ein Minimum und dann für sehr kleine Temperaturen gegen unendlich (Lord Kelvin)
- Onnes versuchte mit hochreinem Quecksilber die 1. Theorie zu bestätigen. Er fand jedoch keine stetige Abnahme des Widerstands, sondern innerhalb weniger hundertstel Grad um 4.2 K einen Sprung des Widerstands auf unmessbar klein (Abb. 7.1).

→ Ein neuer Zustand war gefunden, der sog. *supraleitende Zustand*.

## 7.3 Ein paar Fakten

- Der elektrische Widerstand wird bei Eintritt der Supraleitung um mindestens 14 Größenordnungen kleiner. Ein in einem supraleitenden Ring induzierter Strom fließt ewig, es entsteht keine Verlustwärme.
- Auch andere Metalle können supraleitend werden, z.B. Zinn und Blei. Die Übergangstemperatur liegt dabei zwischen einigen hundertstel und 10 K.
- Es ist kein Zusammenhang erkennbar zwischen Übergangstemperatur und anderen charakteristischen Eigenschaften der Metalle.
- Sowohl in kristalliner Struktur als auch in amorpher Struktur kann Supraleitung stattfinden.
- Ferromagnetische Materialien (Eisen, Nickel...) können nicht supraleitend werden.
- Supraleitende Legierungen (über 1000 bekannt) können aus Komponenten bestehen, die selbst nicht supraleitend sind.
- 1964: W.A. Little vermutet, dass es organische Stoffe mit sehr hohen Übergangstemperaturen gibt. Man kennt inzwischen organische Supraleiter, aber nur mit sehr niedrigen Übergangstemperaturen.

Fazit: Supraleitung ist eine sehr allgemeine Eigenschaft der metallisch leitenden Stoffe (siehe Abb. 7.2).

Li	Be	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
	0.026		0.39	5.38							0.875	1.091	Ge	As	Se	Br	Kr
Na	Mg		100	1420							53	51	Ge	As	Se	Br	Kr
		Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
			0.546	9.50	0.92	7.77	0.51	0.0003			0.56	3.4035	3.722				
			47	1980	95	1410	70	0.049			30	293	309				
		La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
		6.00	0.12	4.483	0.012	1.4	0.655	0.14			4.153	2.39	7.193				
		1100		830	1.07	198	65	19			412	171	803				
Fr	Ra	Ac															
			Ce	Pr	Nd		Yb	Lu									
								0.1									
			Th	Pa	U												
			1.368	1.4													
			1.62														

Sprungtemperatur [K]  
Kritisches Magnetfeld [Gauss]

keine Supraleiter

Supraleiter unter Druck

Abbildung 7.2: Supraleitung bei den Elementen des Priodensystems.

## 7.4 Supraleiter 1. Art

Das Verschwinden des elektrischen Widerstands ist nicht der einzige Effekt von Supraleitern. Sie beeinflussen auch Magnetfelder, dies zeigt sich anhand des *Meissner-Ochsenfeld-Effekt*:

- 1933 zeigen Meissner und Ochsenfeld, dass ein Supraleiter immer ein Magnetfeld aus seinem Inneren verdrängt (Abb. 7.3).
- Legt man einen Permanentmagneten auf eine Bleischale und kühlt dann ab, bis das Blei supraleitend wird, so beginnt der Magnet über der Schale zu schweben.

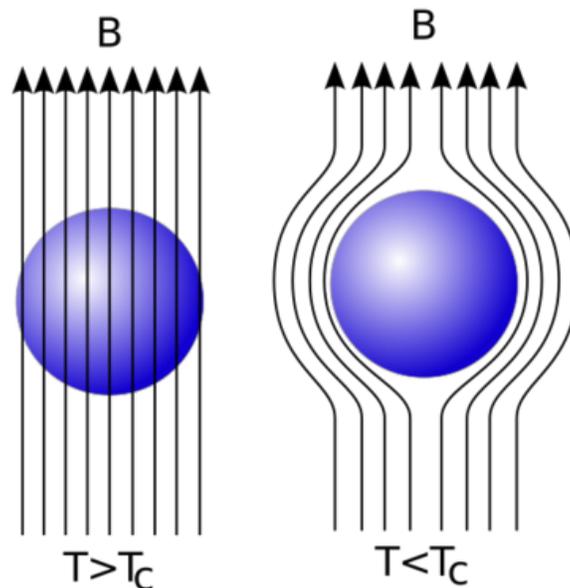


Abbildung 7.3: Schematische Darstellung des Meissner-Ochsenfeld-Effekts. Sinkt bei einem Supraleiter die Temperatur unter den kritischen Wert  $T_c$ , wird ein äußeres Magnetfeld aus dem Inneren des Supraleiters verdrängt. (Quelle: [www.scienceblogs.de](http://www.scienceblogs.de))

Supraleiter 1. Art verdrängen ein (äußeres) Magnetfeld aus ihrem Inneren bis auf eine dünne Oberflächenschicht. Dort fließen sog. Abschirmströme, die ein weiteres Eindringen des Magnetfeldes verhindern. Sie errichten nach der Lenzschen Regel ein Magnetfeld, das dem angelegten Magnetfeld entgegenwirkt, es kompensiert. Wird das äußere Magnetfeld zu groß, wird es für den Supraleiter zu energieaufwändig, Abschirmströme zu unterhalten. Jetzt bricht die Supraleitung zusammen.

## 7.5 Supraleiter 2. Art

- Auch Supraleiter 2. Art zeigen den Meissner-Ochsenfeld-Effekt. Sie vertragen aber viel höhere Magnetfelder als Supraleiter 1. Art und deshalb auch höhere Ströme.
- Ab einem bestimmten kritischen Wert kann das Magnetfeld in den Supraleiter teilweise eindringen, ohne die Supraleitfähigkeit zu zerstören. Erst bei einem noch höheren Wert bricht die Supraleitung zusammen.
- Der Zustand zwischen diesen beiden kritischen Magnetfeldstärken wird *Shubnikov-Phase* genannt. In der Shubnikov-Phase ist der Supraleiter von sog. magnetischen *Flussschläuchen* durchsetzt (Abb. 7.4). Innerhalb der Flussschläuche ist das Material normalleitend.
- Fließt ein Strom durch den Supraleiter, wirkt auf die Flussschläuche die Lorentz-Kraft, die Flussschläuche beginnen zu wandern. Dabei wird Energie verbraucht, es entsteht also ein elektrischer Widerstand (kein verlustfreier Ladungstransport). Sind die Flussschläuche nicht frei verschiebbar, sitzen also an sog. Haftstellen (pinning centers) fest, spricht man von *harten Supraleitern*. Diese sind die technisch bedeutsamen Supraleiter.
- In harten Supraleitern kann man Magnetfelder (bzw die Flussschläuche) einfrieren und so z.B. supraleitende Permanentmagnete schaffen.
- Durch Verunreinigung bzw Zugabe von Fremdmetall kann aus jedem Supraleiter 1. Art ein Supraleiter 2. Art werden. Legierungen sind im allgemeinen Supraleiter 2. Art.

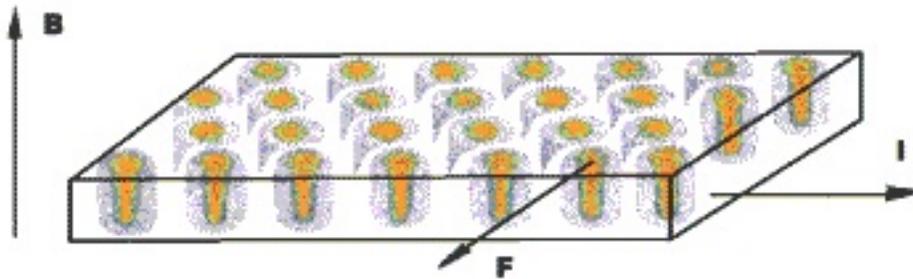
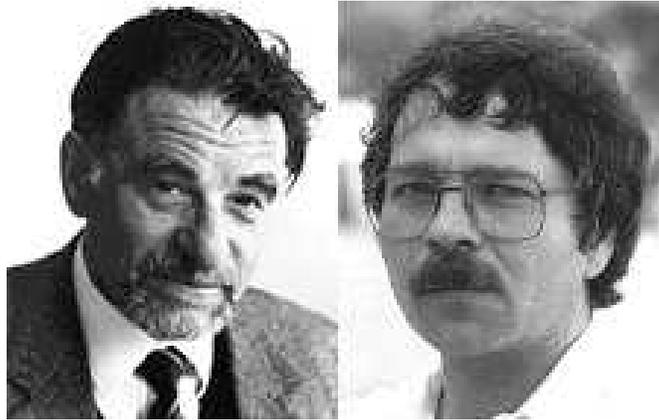


Abbildung 7.4: Flussschläuche in einem Supraleiter 2. Art. (Quelle: [www.scienceblogs.de](http://www.scienceblogs.de))

## 7.6 Hochtemperatur-Supraleiter



- 1986 weisen Georg Bednorz und Alex Müller den Widerstandsabfall und den Meissner-Ochsenfeld-Effekt im La-Ba-Cu-O-System bei einer Übergangstemperatur von 30 K nach.
- 1986/87 wurden die Ergebnisse von einer japanischen Gruppe reproduziert, die Jagd nach neuen Oxiden begann.
- La-Sr-Cu-O zeigt Übergangstemperaturen von über 40 K.
- Y-Ba-Cu-O zeigt Übergangstemperaturen von über 80 K. Nun kann Stickstoff statt Helium zur Kühlung benutzt werden. Das ist billiger und technisch einfacher handzuhaben.
- Bi-Sr-Ca-Cu-O zeigt Übergangstemperaturen von über 110 K.
- Tl-Ba-Ca-Cu-O zeigt Übergangstemperaturen von über 120 K.
- Bisher sind max. Übergangstemperaturen von 150 K erzielt worden, noch höhere erscheinen möglich.
- Aber: Der Mechanismus der Hochtemperatursupraleitung scheint ein anderer zu sein als bei der Tieftemperatursupraleitung. Es kommt auch zur Paar-Bildung ähnlich der Cooper-Paarbildung (siehe Kapitel 7.7), doch die Wechselwirkung, die zu dieser Paarbildung führt, ist völlig unklar.

## 7.7 Der supraleitende Zustand: BCS-Theorie



Effekte der Supraleitung deuten darauf hin, dass eine Wechselwirkung zwischen den Leitungselektronen eine Rolle spielt. Verschiedene Wechselwirkungen wurden diskutiert (Coulomb, magnetisch, etc...), lieferten aber keine auch nur halbwegs befriedigende Theorie.

- 1950/51: Fröhlich und Bardeen schlagen eine Wechselwirkung der Elektronen über die Schwingungen des Gitters des Festkörpers vor.
- 1957: John Bardeen, Leon Cooper und John Schrieffer arbeiten diese Idee zu einer atomistischen Theorie der Supraleitung aus, die sogenannte *BCS-Theorie*.
- 1972 erhalten sie den Nobelpreis für Physik.

Atomrümpfe (ohne Leitungselektronen, die sind frei beweglich) sind in einem Festkörper wie in einem Gitter angeordnet und schwingen leicht um ihre Ruhelage. Setzt man ein Elektron in dieses Gitter, so werden die positiven Atomrümpfe von ihm leicht angezogen. Es kommt zu einer Anhäufung von positiver Ladung in der Umgebung des Elektrons (Polarisierung des Gitters). Ein zweites Elektron spürt die Anhäufung der positiven Ladung und wird dadurch zum ersten Elektron hin angezogen.

→ Es entsteht also eine anziehende Wechselwirkung zwischen zwei Elektronen über die *Polarisation des Gitters* (Abb. 7.5).

*Problem:* Elektronen im Metall sind nicht statisch, sie bewegen sich mit hohen Geschwindigkeiten. Bei der Bewegung durchs Gitter tritt also entlang des Weges Polarisation auf. Das Gitter muss elastisch genug sein, um die polarisierende Wirkung eines sich bewegenden Elektrons mitmachen zu können. Die Atomrümpfe müssen leicht genug sein, damit sie rasch aus der Ruhelage schwingen können. Schwere Isotope schwingen langsamer als leichte, die Wechselwirkung über die Schwingung des Gitters ist deshalb geringer, die Übergangstemperatur in den supraleitenden Zustand tiefer (*Isotopeneffekt*).

Das zweite Elektron fliegt nun in der Polarisationsspur des ersten. Da das Gitter bereits polarisiert ist, wird seine Energie abgesenkt. Die beiden Elektronen haben gleichgroßen, aber entgegengesetzten Impuls und Spin (Eigendrehimpuls) (führt zu Absenkung der Gesamtenergie). Man nennt solch ein Elektronenpaar *Cooper-Paar*. Ihre gegenseitige Anziehung lässt sich auch durch den Austausch sog. Phononen (Schallquanten) beschreiben. Die mittlere Ausdehnung eines Cooper-Paares liegt bei 100 nm bis 1000 nm, der Abstand zweier Leitungselektronen jedoch nur bei einem Zehntel Nanometer. Cooper-Paare überlappen also extrem stark.

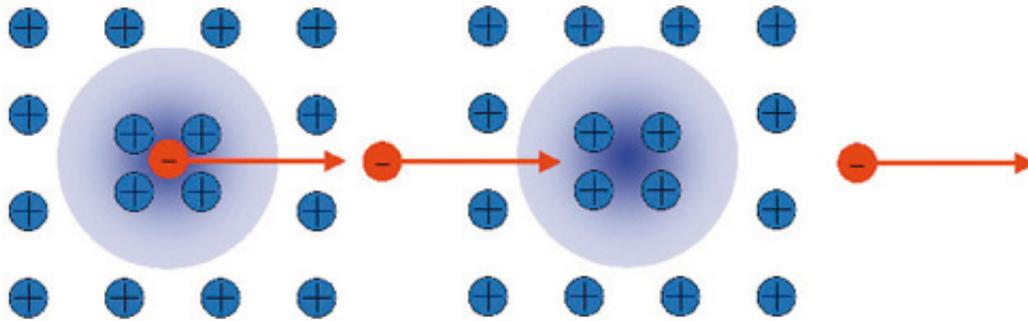


Abbildung 7.5: Cooperpaarbildung in einem Supraleiter. (Quelle: Bernhard Keimer MPI for Solid State Research)

Ein Verständnis der Eigenschaften eines Supraleiters ist erst möglich, wenn man die Gesamtheit der Cooper-Paare betrachtet. Die experimentellen Erfahrungen zeigen, dass alle Cooper-Paare im selben Quantenzustand sind, d.h. alle Paare stimmen in allen physikalischen Größen überein. Wird eine Spannung angelegt, werden die Cooper-Paare beschleunigt, sie erhalten einen Impuls. Dieser Impuls muss für alle exakt gleich sein.

Ein einzelnes Cooper-Paar kann also nicht mit dem Gitter Impuls austauschen (z.B. durch Stöße), da es sonst nicht mehr im gleichen Zustand wie die anderen wäre. Nur wenn die Bindungsenergie eines Cooperpaares aufgewendet wird, wird das Paar zerstört und eine Wechselwirkung mit dem Gitter kann wieder stattfinden. Dies erklärt den widerstandslosen Ladungstransport durch das Gitter, also die Tatsache, dass der elektrische Widerstand im Supraleiter verschwindet. Ab einem kritischen Strom ist allerdings die kinetische Energie der Cooper-Paare so groß wie ihre Bindungsenergie, sie werden aufgebrochen, die Supraleitung bricht zusammen.

## 7.8 Fermionen und Bosonen

- Teilchen mit halbzahligem Spin (zb.  $1/2$ ) sind *Fermionen*.
- Teilchen mit ganzzahligem Spin (zb. 1) sind *Bosonen*.
- Fermionen können jeden Quantenzustand nur einmal besetzen (*Pauli-Verbot*), in einem „Haufen“ aus Bosonen können dagegen alle Bosonen in demselben Quantenzustand sein.
- Elektronen sind Fermionen !!
- Cooper-Paare bestehen zwar aus Elektronen, verhalten sich aber wie Bosonen.
- Man kann Cooper-Paare also als neue, eigenständige Teilchen auffassen, solange sie nicht aufgebrochen werden.
- Die Gesamtheit aller Cooper-Paare in einem Supraleiter lässt sich durch *eine einzige Wellenfunktion* beschreiben (vgl. Bose-Einstein-Kondensat Kap. 8) !

## 7.9 Anwendungsgebiete für Supraleiter

- *Supraleitende Stromkabel*  
Es existieren bereits supraleitende Stromkabel, in deren Innerem Helium und Stickstoff zur Kühlung fließen. Die Keramiken der HTSL sind allerdings recht spröde und schwer zu verarbeiten (Abb. 7.6).
- *Supraleitende Magnete*  
Aus harten Supraleitern hergestellte Spulen können großflächige Magnetfelder größer 10 Tesla erzeugen. Angewendet werden sie bei Kernspintomographen, Teilchenbeschleunigern, Fusionsreaktoren etc. (Abb. 7.7).
- *Magnetfeldsensoren*  
Superconducting Quantum Interference Devices (SQUIDS) können selbst winzigste Magnetfelder von  $10^{-15}$  T (Femto-Tesla) nachweisen. Anwendungsgebiete sind z.B. Biomagnetismus (Magnetoenzephalographie, Magnetokardiographie,...), zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, Geophysik.



Abbildung 7.6: Supraleitendes Kabel. Ein Beispiel für den operationellen Einsatz der Hochtemperatur-Supraleitung: In einer Stromverteilungsanlage von Kopenhagen, die etwa 50 000 Haushalte versorgt, hat die Firma NKT Cables supraleitende BSCCO-Kabel verlegt. (Quelle: ec.europa.eu)



Abbildung 7.7: Supraleitender Magnet. Der weltweit größte Magnet für bildgebende Verfahren in der Hirnforschung ist der 9,4 Tesla-NMR-PET (Mai 2008). Der rund vier Meter lange und 57 t schwere supraleitende Magnet kam per Schwertransport aus Großbritannien (Oxford) nach Jülich, wurde im Laufe des Tages per Kran abgeladen und in das eigens für ihn errichtete neue Gebäude gebracht. Dort sorgen in einem 150 m<sup>2</sup> großen Raum 870 t Stahl für die Abschirmung des Magnetfeldes nach außen. (Quelle: www.fz-juelich.de)

### 7.9.1 Anwendung: SQUID

Ein Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) wird eingesetzt, wenn man winzige Magnetfelder messen will. Winzig bedeutet hierbei  $10^{-15}$  T (Femto-Tesla), also etwa eine Milliarde mal schwächer als das Erdmagnetfeld ( $3\text{-}6 \cdot 10^{-5}$  T). Ein SQUID besteht aus einem ringförmigen Supraleiter, der an einer oder zwei Stellen durch normalleitendes oder isolierendes Material unterbrochen ist (Abb. 7.8). Diese Unterbrechung heißt *Josephson-Kontakt*. Sie ist extrem dünn, so dass die Cooperpaare mittels quantenmechanischem Tunneleffekt hindurchtunneln können, ihre Wellenfunktionen überlagern sich. Es entsteht ein sog. Supra-Strom ohne dass eine Spannung anliegt. Wird nun von außen ein Gleichstrom am SQUID angelegt, brechen einzelne Cooperpaare auf, eine Spannung wird messbar (elektr. Widerstand ist wieder da). Diese Spannung wird durch ein äußeres Magnetfeld, das den Supraleiter teilweise durchdringt (magnet. quantisierte Flussschläuche), beeinflusst. Auf diese Weise können bereits kleinste Änderungen eines äußeren Magnetfeldes bestimmt werden. Allerdings ist es notwendig, meist vorhandene starke Störfelder, z. B. das Erdmagnetfeld, abzuschirmen.

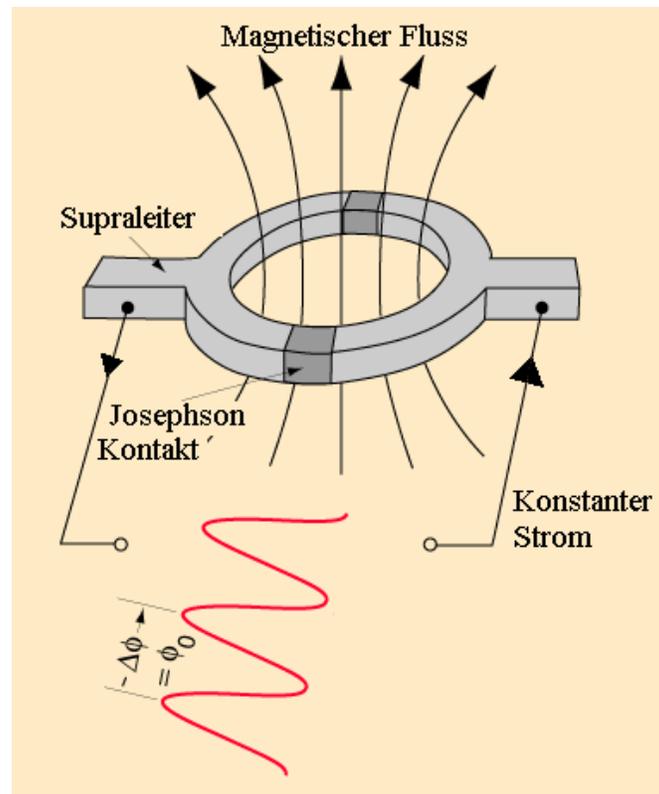
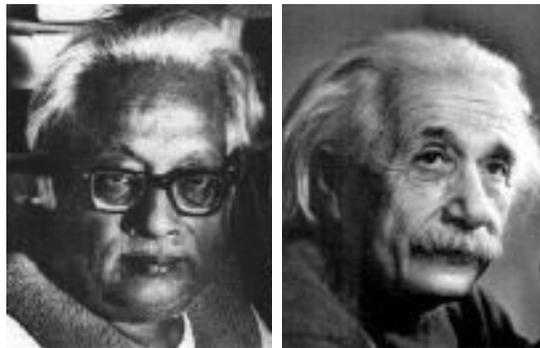


Abbildung 7.8: Schematische Darstellung eines SQUID (Quelle: wikimedia commons)

# Kapitel 8

## Bose-Einstein-Kondensation



### 8.1 Die Anfänge

- Anfang 1920er: Sathendra Nath Bose stellt Regeln auf, die bestimmen, wann Photonen identisch sind und wann nicht (Bose-Statistik).
- Albert Einstein erweitert diese Theorie auf Atome und kommt zu dem Schluss, dass bei sehr tiefen Temperaturen etwas seltsames passiert. Die meisten Atome müssen dann im selben Quantenzustand sein, dies gilt jedoch nur für Bosonen, nicht für Fermionen.
- Bedeutung: Atome sind nicht mehr unterscheidbar, sie sind alle identisch und durch eine einzige Wellenfunktion beschreibbar.

→ In einem BEC befinden sich die Atome (im Rahmen der Heisenbergschen Unschärferelation) alle am selben Ort !

## 8.2 Die Erzeugung eines BEC



- Die Bestätigung der Voraussagen von Bose und Einstein gelang erst 70 Jahre später.
- 1995 erschaffen Cornell und Wieman (Boulder) und unabhängig davon Ketterle (MIT) das erste BEC.
- 2001 bekamen alle drei dafür den Nobelpreis für Physik.
- Kühltechnik: zuerst Laserkühlen, dann Verdampfungskühlen
- Die notwendige Ausrüstung war vergleichsweise billig: 100 000 US\$.
- Temperatur, die zur Bildung eines BEC erreicht werden muss: kleiner als 1 millionstel Grad über dem absoluten Nullpunkt - das ist eine million mal kälter als der intergalaktische Raum.

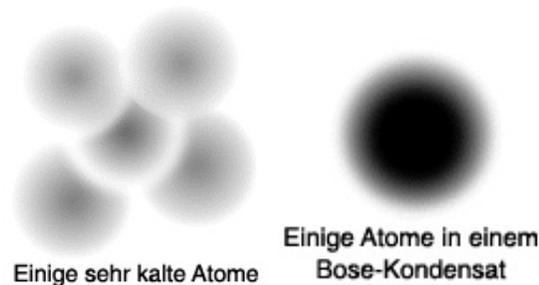


Abbildung 8.1: Schematische Darstellung des Übergangs in ein Bose-Einstein-Kondensat (Quelle: [www-solidstate.physik.uni-bremen.de](http://www-solidstate.physik.uni-bremen.de)).

## 8.3 Laserkühlung

- Je mehr sich Atome bewegen, desto wärmer ist es. Man muss also die Bewegung der Atome bremsen. Prinzip der Laserkühlung: Photonen eines Lasers kommen aus einer Richtung. Atome absorbieren die Photonen und re-emittieren sie wieder in eine beliebige Richtung. Dies erzeugt netto „Druck“ in eine Richtung, Atome aus dieser Richtung werden gebremst (Abb. 8.2).
- Problem: Photon muss exakt die richtige Wellenlänge (Farbe) haben, um absorbiert werden zu können. Dies ist technisch sehr schwierig.
- Nobelpreis 1997 (Chu, Cohen-Tannoudji, Phillips)
- Atome bewegen sich, sehen auf Grund der Dopplerverschiebung die Photonen also rot- bzw. blauverschoben. Man verstimmt nun den Laser etwas, so dass die Photonen mit Hilfe der Dopplerverschiebung nur für bestimmte (dem Laserstrahl entgegenlaufende) Atome die richtige Farbe haben und diese abbremst. Auf die anderen Atome wirken die Photonen nicht, da sie die falsche Farbe haben.
- Praxis: Laser aus allen Raumrichtungen, die Farbe des Lasers wird durchgestimmt. Atome bewegen sich langsamer, werden kälter. Es entsteht ein optischer Sirup.
- Technisch sehr anspruchsvoll, bereits kleinste Vibrationen (z.B. Aufzug im Gebäude) verstimmen den Laser.
- Erreichbare Temperatur: etwa ein zehntausendstel Grad über dem absoluten Nullpunkt, immer noch zu heiß für ein BEC.

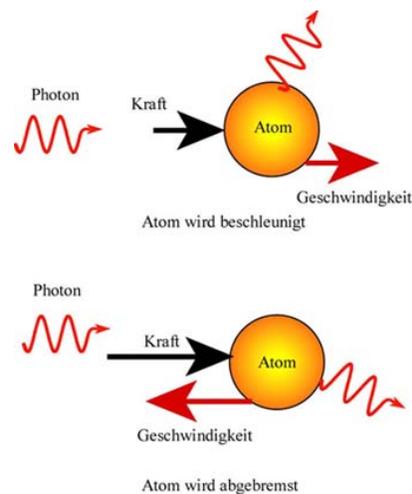


Abbildung 8.2: Prinzip der Laserkühlung (Quelle: [www.mpg.de](http://www.mpg.de)).

## 8.4 Verdampfungskühlung

- Mit Laser kann man nicht weiter abkühlen, da die Photonen den Atomen immer kleine Stöße versetzen, die Atome also nie zur Ruhe kommen.
- Neues Prinzip: Verdampfungskühlen mit einer magnetischen Falle (Abb. 8.3). Ein starkes Magnetfeld zieht an den magnetischen Momenten der Atome und hält sie, bei geeigneter Geometrie des Magnetfeldes, in der Mitte der Zelle.
- Die energiereichsten Atome lässt man jetzt aus der Falle entweichen. Der Rest wird dadurch kühler (vgl. heißer Kaffee).
- Durch vorsichtiges Absenken des Potentialwalles kann man den Abkühlvorgang beschleunigen und es bleiben dennoch viele Atome gefangen.

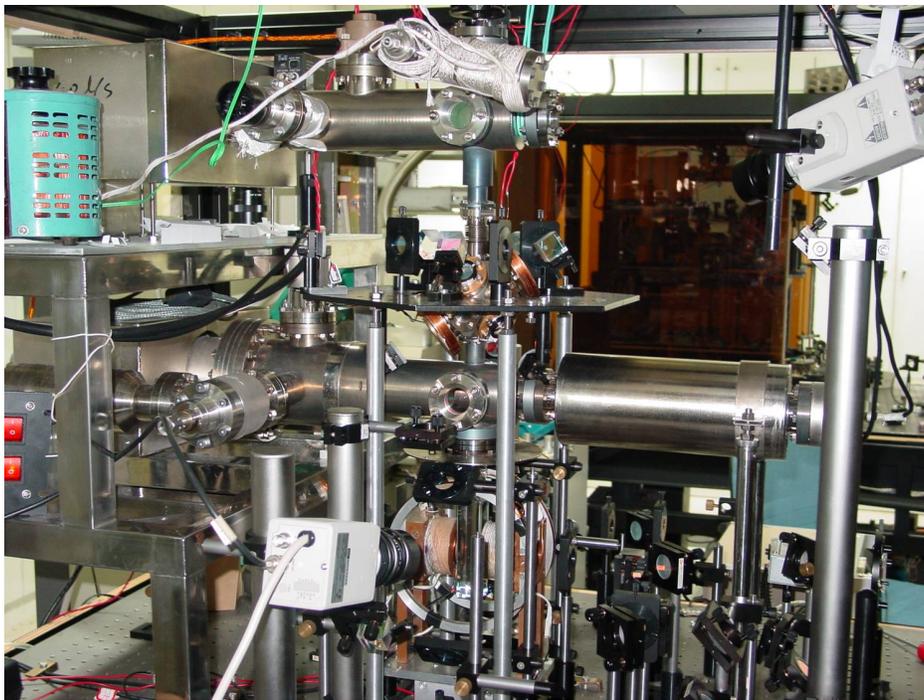


Abbildung 8.3: Laborexperiment für ein Bose-Einstein-Kondensat mit  $^{87}\text{Ru}$  (Quelle: Institute of Quantum Electronics, Peking Univ.).

## 8.5 Das Kondensat

Ab etwa 200 milliardstel Grad beginnt sich ein Klumpen in der Mitte der Magnetfalle zu bilden. Die Atome im Zentrum fallen alle in den gleichen Quantenzustand und sammeln sich am selben Ort (Abb. 8.4).

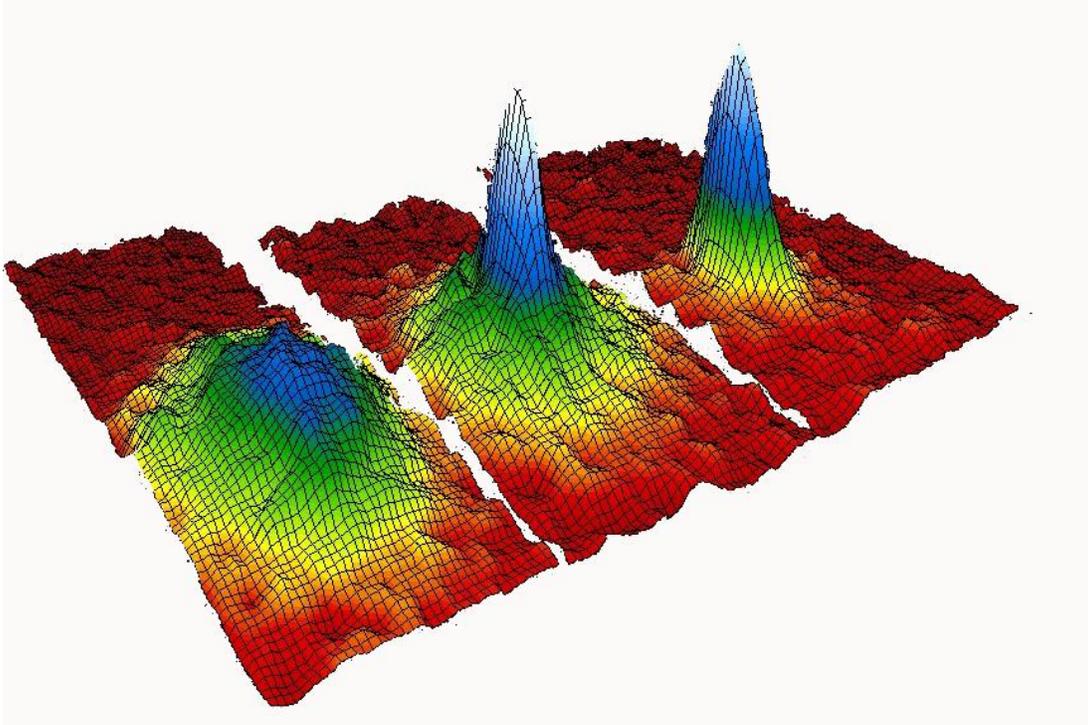


Abbildung 8.4: Ausbildung des Bose-Einstein-Kondensats. (Quelle: [www.bec.nist.gov](http://www.bec.nist.gov)).

## 8.6 Was kann man mit einem BEC anfangen ?

- Es ist viel zu neu (15 Jahre), um das sagen zu können.
- Es ist unglaublich zerbrechlich.
- Es ist bisher nur in geringsten Mengen herstellbar ( $10^7$  Atome).
- Ein BEC gelingt bisher nur mit wenigen Atomsorten ( ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^{23}\text{Na}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$ ,  ${}^{41}\text{K}$ ,  ${}^{52}\text{Cr}$ ,  ${}^{85}\text{Rb}$ ,  ${}^{87}\text{Rb}$ ,  ${}^{133}\text{Cs}$ ,  ${}^{174}\text{Yb}$ ).
- Ein BEC ist einem Laserlicht sehr ähnlich. Man kann vielleicht eines Tages ein BEC so einsetzen wie einen Laser (Atom-Laser), z.B. um Strukturen herzustellen (Mikrochips).....



**Teil II**  
**Trimester 3**



# Kapitel 9

## Einführung

Im 3. Trimester wollen wir einen experimentellen Blick in die Physik werfen und naturwissenschaftliches Arbeiten kennenlernen.

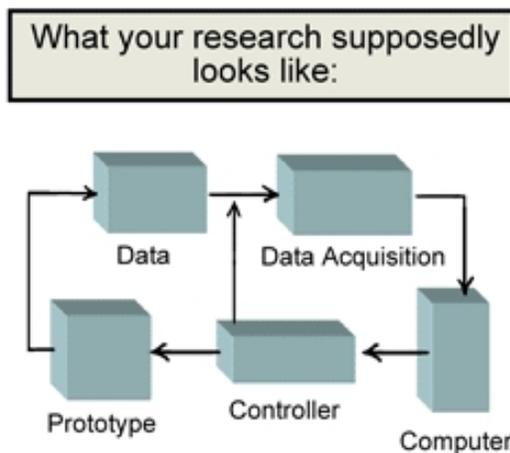


Figure 1. Experimental Diagram

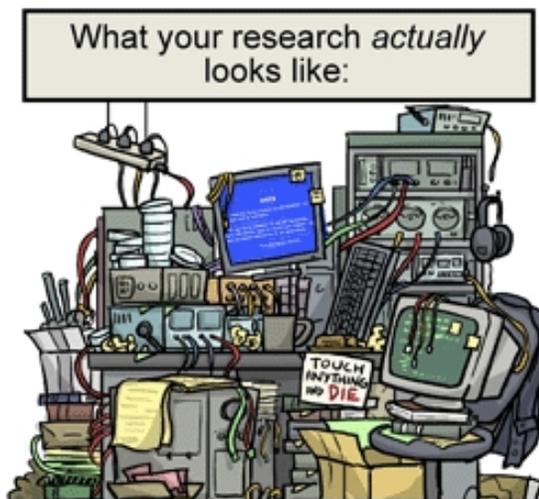


Figure 2. Experimental Mess

WWW.PHDCOMICS.COM JORGE CHAM © 2008

Wir werden hierzu Experimente aus verschiedenen Themengebieten durchführen: *Maxwellrad* (Mechanik), *Elektronen im Fadenstrahlrohr & Millikanversuch: Bestimmung der Masse und Ladung des Elektrons* (Elektromagnetismus, Lorentzkraft), *Eindringtiefe ionisierender Strahlung* (Radioaktivität), Bau einer *Nebelkammer*.

Die Experimente werden zuerst thematisch in ein oder zwei Doppelstunden eingeführt, der zum Verständnis nötige Hintergrund wird erarbeitet. Dann werden die Versuche in Zweier- oder Dreiergruppen durchgeführt, meist am Physikalischen Institut (PIT) auf der Morgenstelle (Gebäude D, Abb. 9.1) oder am Astronomischen Institut AIT auf dem Sand (Abb. 9.2). Hierzu vereinbaren wir Sondertermine, abends oder an Wochenenden. Zu jedem Versuch fertigt jede Gruppe eine schriftliche Ausarbeitung an (siehe Abschnitt 9.2).

## 9.1 Ort des Geschehens

Hier findet ihr die Institute auf der Morgenstelle:

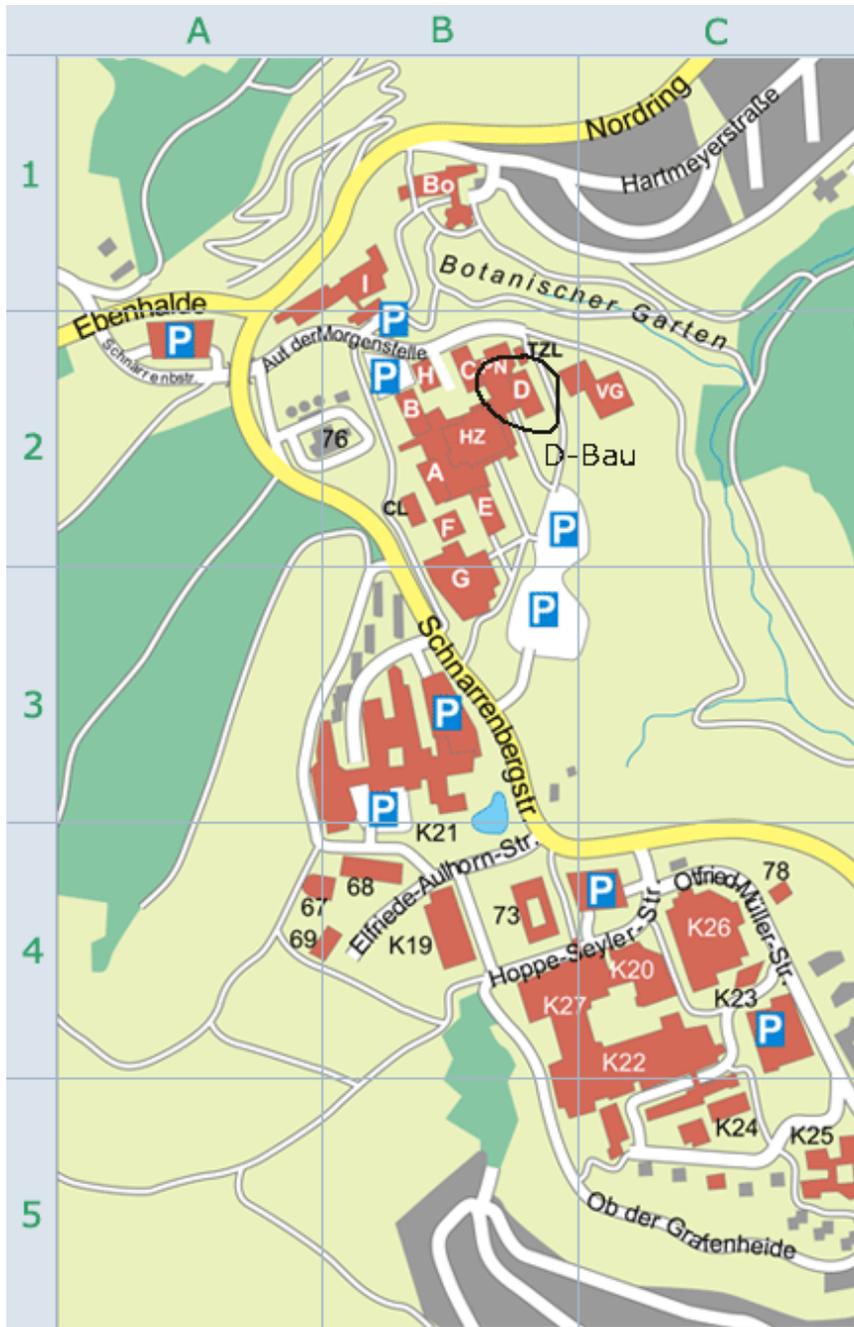


Abbildung 9.1: Übersichtsplan Morgenstelle (<http://www.uni-tuebingen.de/uni/qvr/08p/08p-f57.html>)

Hier findet ihr das Astronomische Institut auf dem Sand:

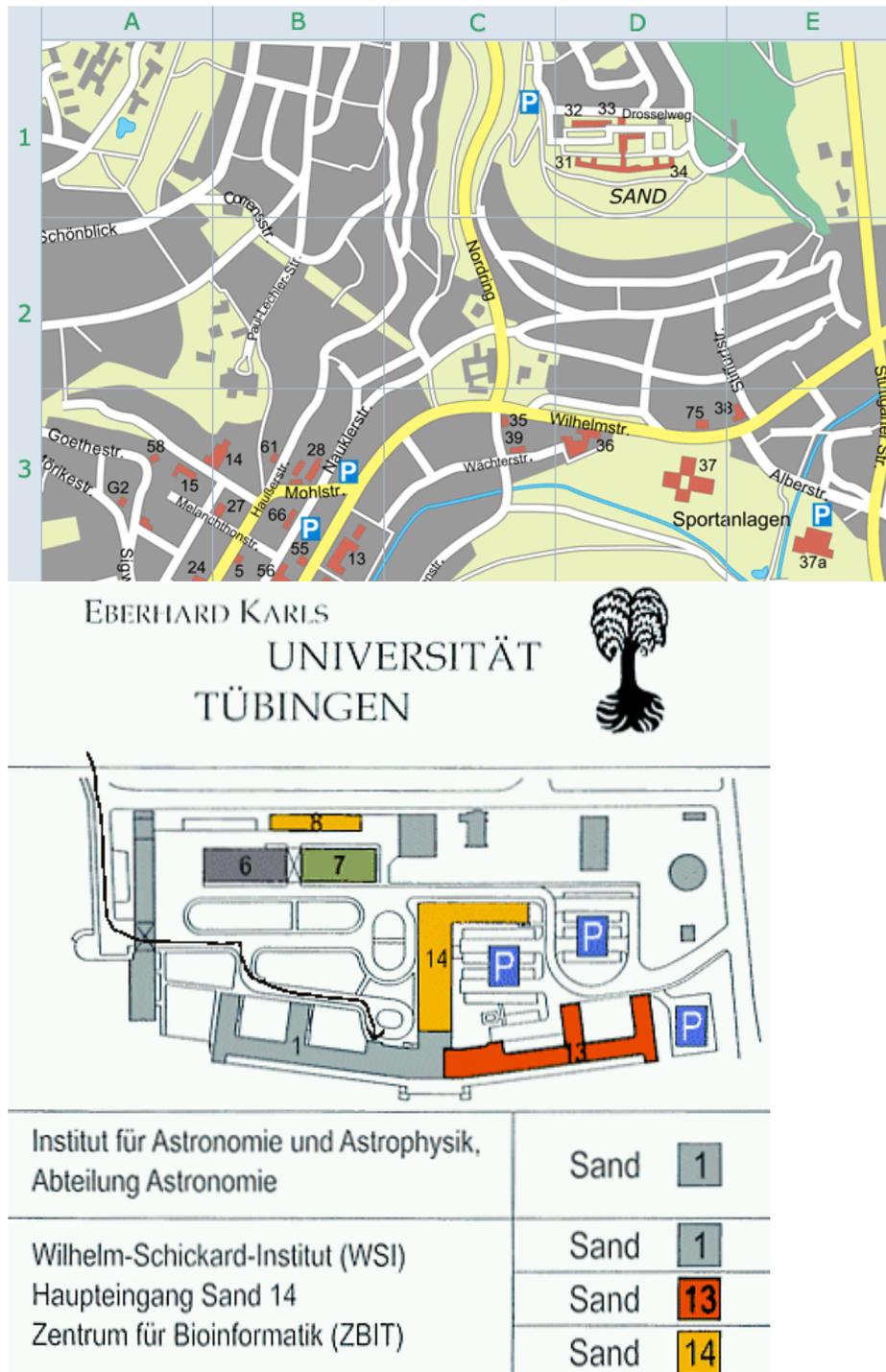


Abbildung 9.2: Übersichtsplan Sand (<http://astro.uni-tuebingen.de/about/location.shtml>)

## 9.2 Auswertung der Experimente

Zu jedem Experiment wird pro Gruppe eine schriftliche Auswertung angefertigt. Diese Auswertung soll folgendermaßen aufgebaut sein:

### 1. Ziel und Inhalt des Experiments

- was soll gezeigt bzw. herausgefunden werden ?
- was ist der größere Kontext ?

### 2. Material, Methoden, Durchführung

- verwendetes Material (Messapparate etc.) genau erläutern
- genaue, detaillierte Experimentbeschreibung
- Skizzen des Aufbaus und Ablaufs, falls erforderlich
- evtl. Probleme und ihre Lösungen schildern

### 3. Darstellung der Ergebnisse

- Messwertetabelle mit genauer Erläuterung und Bezeichnung
- graphische Darstellungen mit Beschriftung
- durchgeführte Berechnungen, verwendete Gleichungen, Statistik und Fehlerrechnung

### 4. Interpretation und Diskussion

- wurde das gesetzte Ziel erreicht ?
- was sagt uns das Ergebnis, was kann man daraus lernen ?
- muss das Experiment verändert werden, um das Ziel zu erreichen ?
- gegebenenfalls Abweichung des Ergebnisses von Literaturwerten diskutieren

# Kapitel 10

## Das Maxwellrad

### 10.1 Motivation

Bei einer geradlinig gleichförmigen Bewegung mit der Geschwindigkeit  $v$  gilt für den in der Zeit  $t$  zurückgelegten Weg  $s$ :

$$s = v \cdot t$$

Die kinetische Energie (Bewegungsenergie)  $E_{\text{kin}}$  eines so bewegten Körpers der Masse  $m$  schreibt sich:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Soll nun aus dem Ruhezustand heraus die Geschwindigkeit  $v$  erreicht werden, muss für eine gewisse Zeit  $t$  eine Beschleunigung  $a$  wirken:

$$v = a \cdot t$$

Für den zurückgelegten Weg  $s$  gilt dann, solange die Beschleunigung  $a$  anhält,

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

**Beispiel 1:** Ein Stein fällt aus einer bestimmten Höhe  $h$  im Vakuum auf den Boden.

Während der gesamten Fallphase wirkt die konstante Beschleunigung  $g$ , die Erdbeschleunigung. Die Geschwindigkeit des Steines ändert sich also laufend. Betrachtet man die Energie des Steines, so setzt sie sich zusammen aus seiner potentiellen Energie  $E_{\text{pot}}$  (Lageenergie) und seiner kinetischen Energie  $E_{\text{kin}}$ :

$$\begin{aligned} E_{\text{ges}} &= E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}} \\ &= m \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \end{aligned}$$

Die potentielle Energie nimmt während seines Fallens ab, die kinetische dagegen zu,  $E_{\text{pot}}$  wird in  $E_{\text{kin}}$  umgewandelt. Die Gesamtenergie des Systems bleibt erhalten.

Was ändert sich, wenn man die Luftreibung berücksichtigt ?

### Erhaltungsgrößen

In der Natur gibt es zahlreiche physikalische Erhaltungsgrößen, beschrieben durch Erhaltungssätze, zum Beispiel:

- Energie  $E$
- Impuls  $p$
- Drehimpuls  $L$
- elektrische Ladung  $q$

Eiskunstläufer nutzen beispielsweise den Drehimpulserhaltungssatz aus, wenn sie bei Pirouetten unterschiedliche Drehgeschwindigkeiten erzielen möchten.

**Beispiel 2:** Der Fallschirmsprung

Ein Fallschirmspringer springt bekanntlich nicht im Vakuum, sondern in der Erdatmosphäre. Wieso würde ein Vakuumsprung auch gar keinen Sinn machen? Während seines freien Falls wird er von der Erdanziehung auf immer höhere Geschwindigkeiten beschleunigt, gleichzeitig aber von der Luftreibung gebremst. Dieser Luftwiderstand wächst quadratisch mit der Geschwindigkeit an. Bereits nach wenigen Sekunden bildet sich zwischen der nach unten gerichteten Erdbeschleunigung und der entgegenwirkenden Reibung ein Gleichgewicht aus, die Endgeschwindigkeit ist erreicht. In der typischen Fallschirmspringerhaltung (geöffnetes X) beträgt sie etwa 200 km/h.

Man setzt ein Kräftegleichgewicht an und erhält eine Differentialgleichung:

$$\begin{aligned} F_{\text{resultierend}} &= F_g - F_{\text{Luft}} \\ m \cdot a &= m \cdot g - k \cdot v^2 \\ m \frac{dv}{dt} + k \cdot v^2 &= m \cdot g \end{aligned}$$

wobei gilt

$$k = 0.5 \cdot c_w \cdot A \cdot \rho$$

mit dem Widerstandsbeiwert  $c_w$  und der Querschnittsfläche  $A$  des fallenden Körpers sowie der Luftdichte  $\rho$ . Die analytische Lösung der Differentialgleichung lautet:

$$v(t) = \sqrt{\frac{m \cdot g}{k}} \tanh\left(\sqrt{\frac{k \cdot g}{m}} \cdot t\right)$$

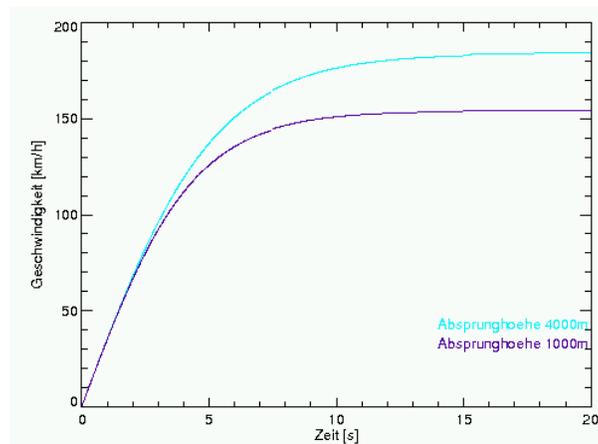


Abbildung 10.1: Geschwindigkeitsverlauf bei einem Fallschirmsprung.

**Beispiel 3:** Das JoJo, von Physikern auch Maxwellrad genannt.

Zusätzlich zur Translationsbewegung (geradliniges Fallen) kommt nun noch eine Rotationsbewegung der Drehscheibe dazu. Zur Beschreibung der Rotation wird das sog. Trägheitsmoment  $J$  des Körpers, also der Drehscheibe, benötigt. Das Trägheitsmoment  $J$  übernimmt die Rolle der trägen Masse bei Translation. Es gilt:

$$J = \sum_i m_i r_i^2 = \int r^2 dm$$

Für die Rotationsenergie  $E_{\text{rot}}$  eines Körpers, der mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  rotiert, lässt sich schreiben

$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$$

Die Gesamtenergie der fallenden Scheibe des Maxwellrades setzt sich also zusammen aus der potentiellen Energie, der kinetischen Energie der Translationsbewegung und der Rotationsenergie:

$$E_{\text{ges}} = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}} + E_{\text{rot}}$$

### Drehimpulserhaltung beim Eiskunstlauf

Für den Drehimpuls  $L$  gilt

$$L = J \cdot \omega = \int r^2 dm \cdot \omega$$

Wenn der Eiskunstläufer seine Arme an den Körper legt, verringert er den Abstand  $r$  der Masse  $dm$  von der Drehachse und damit das Trägheitsmoment  $J$ . Da der Drehimpuls  $L$  erhalten bleibt, beginnt er sich schneller zu drehen, seine Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  nimmt zu.

## 10.2 Durchführung

Lasst das Maxwellrad aus fünf verschiedenen, möglichst äquidistanten Höhen jeweils fünf mal bis zum Umkehrpunkt fallen (Abb. 10.2) und misst die Fallzeit. Achet darauf, dass es beim Fallen nirgends anstößt. Protokolliert alles exakt mit, erstellt in der Ausarbeitung eine Messwertetabelle mit Fehlerrechnung (Mittelwert, Standardabweichung etc.).

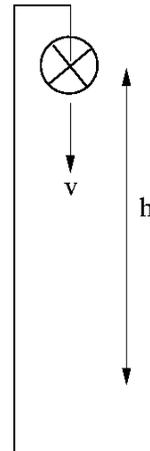


Abbildung 10.2: Schema des Maxwellrads: Das Rad fällt mit der Geschwindigkeit  $v$  entlang der Strecke  $h$ .

### 10.2.1 Aufgaben

1. Gilt auch im Falle des Maxwellrades die folgende Proportionalität zwischen Wegstrecke (Fallhöhe)  $s$  und Zeit  $t$ :

$$s \sim t^2$$

Tragt dazu eure gemessenen Wegstrecken (Höhen) und Zeiten in ein Diagramm ein. Welche Achsenwahl ist am sinnvollsten ?

2. Wie groß ist die effektive Beschleunigung  $a$  im Falle des Maxwellrades verglichen mit der normalen Erdbeschleunigung  $g$ , wenn ihr davon ausgeht, dass das Beschleunigungsgesetz

$$s = \frac{1}{2} a t^2$$

auch für das Maxwellrad gilt ? Versucht  $a$  aus eurem Diagramm abzulesen bzw. zu berechnen.



# Kapitel 11

## Die Lorentzkraft

### 11.1 Historie

- Magnetismus und Elektrostatik sind seit Jahrtausenden als Phänomen bekannt
- 1785: Coulomb formuliert das Coulombgesetz (Kraft, die zwischen zwei elektrischen Ladungen wirkt)
- 1820: Ørsted entdeckt, dass elektrische Ströme eine Kompassnadel auslenken
- 1820: A.M. Ampère zeigt dass stromdurchflossene Leiter Kräfte aufeinander ausüben
- 1820: J.-B. Biot und F. Savart entdecken das Biot-Savart-Gesetz (Kraft zwischen Magnet und stromdurchflossenem Draht nimmt mit  $1/r$  ab)
- 1831: Faraday formuliert die Induktionsgesetze (die Änderung des magnetischen Flusses führt zur Entstehung einer elektrischen Spannung)
- 1864: J.C.Maxwell formuliert die Maxwellgleichungen der Elektrodynamik (beschreiben den Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Feldern)
- 1892: H.A. Lorentz beschreibt die Lorentzkraft
- 1897: J.J. Thomson entdeckt das Elektron
- 1905: A. Einstein formuliert die spezielle Relativitätstheorie

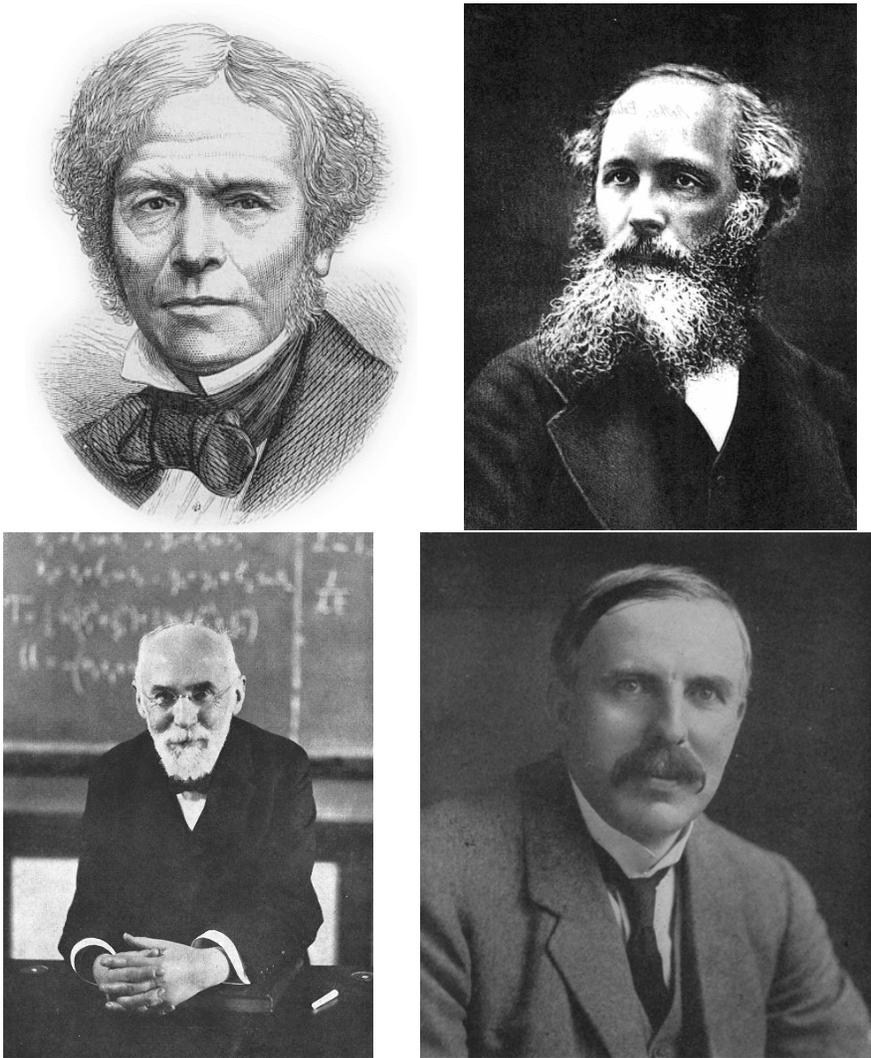


Abbildung 11.1: M. Faraday; J.C. Maxwell, H.A. Lorentz; J.J. Thomson

## 11.2 Motivation

Bewegt sich eine elektrische Ladung in einem Magnetfeld, wirkt auf die Ladung eine Kraft, die sog. Lorentzkraft. Die Lorentzkraft ist maximal, wenn sich die Ladung senkrecht zu den Feldlinien des Magnetfelds bewegt und null, wenn die Ladung sich parallel dazu bewegt. Die Richtung, in die die Kraft wirkt, lässt sich mit Hilfe der 3-Finger-Regel bestimmen: Daumen in Bewegungsrichtung der (negativen) Ladungen, Zeigefinger in Richtung der Magnetfeldlinien und Mittelfinger im rechten Winkel zeigt die Lorentzkraft (Abb. 11.2 links).

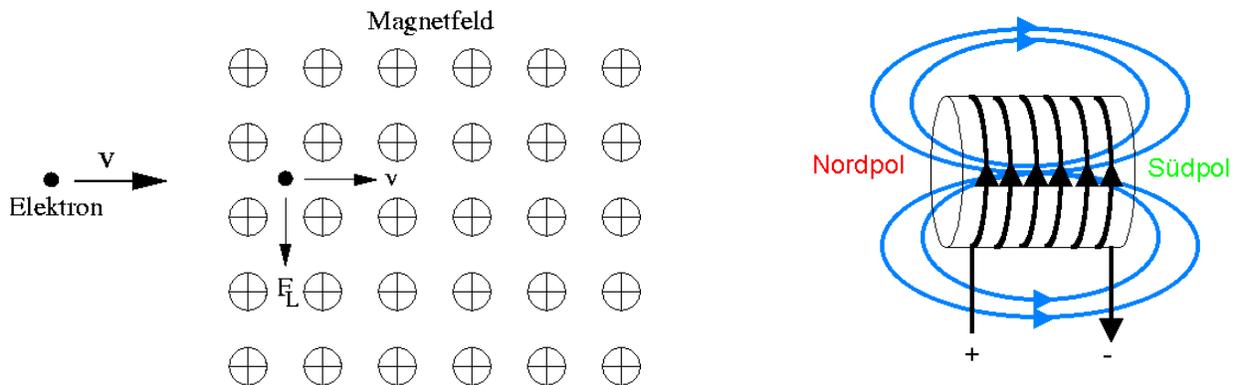


Abbildung 11.2: Links: Skizze zur Lorentzkraft. Das Magnetfeld ist in die Bildebene hinein ausgerichtet. Rechts: Skizze des Magnetfelds einer stromdurchflossenen Spule ([www.der-moba.de](http://www.der-moba.de))

In den beiden Experimenten werden wir zum einen die Ablenkung eines Elektronenstrahls in einem Magnetfeld und zum anderen mittels einer Waage die Kraft eines Magnetfeldes auf einen stromdurchflossenen Leiter messen.

Das Magnetfeld wird jeweils durch eine Spule erzeugt (Abb. 11.2 rechts). Hierbei nutzt man aus, dass ein stromdurchflossener Leiter immer von einem Magnetfeld umgeben ist. Wickelt man den Leiter zu einer Spule, so verstärken sich die Magnetfelder der einzelnen Windungen im Innen- und Außenbereich der Spule, das entstehende Magnetfeld ähnelt dem eines Stabmagneten: am einen Ende der Spule ist der Nordpol, am anderen der Südpol. Im Inneren der Spule herrscht ein nahezu homogenes Feld. Die Stärke des Feldes hängt sowohl von der durch den Leiter fließenden Stromstärke als auch von der Anzahl der Wicklungen ab, beides mal gilt, je mehr, desto stärker das Magnetfeld.

## 11.3 Die Experimente

### 11.3.1 Elektronenstrahl im Magnetfeld

Wir untersuchen das Verhalten eines Elektronenstrahls in einem homogenen, von einem Helmholtzspulenpaar erzeugten Magnetfeld. Die Elektronen werden an einer Glühkathode erzeugt. Die austretenden Elektronen werden durch einen Wehneltzylinder fokussiert und bis zu einer durchbohrten Anode in einem elektrischen Feld der Spannung  $U$  beschleunigt (siehe Abb. 11.3).

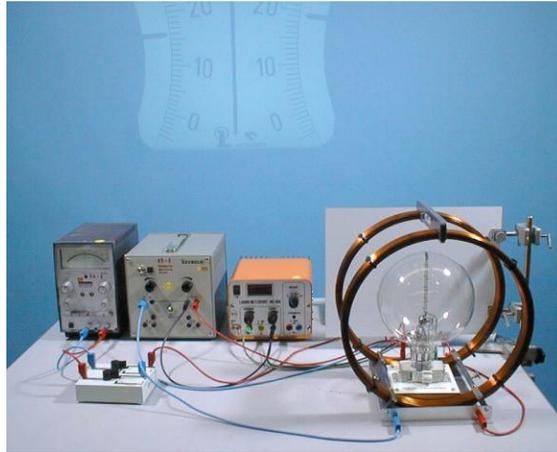


Abbildung 11.3: Aufbau des Experiments (Quelle: Universität Ulm)

Ihre Geschwindigkeit  $v$  kann aus der Beschleunigungsspannung  $U$  berechnet werden, indem ihre kinetische Energie  $E_{\text{kin}}$  und ihre elektrische Energie  $E_{\text{el}}$  gleichgesetzt werden:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{kin}} &= E_{\text{el}} \\
 \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 &= e \cdot U \\
 v &= \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m_e}}
 \end{aligned}$$

$m_e$  : Elektronenmasse

$e$ : elektrische Elementarladung

Auf die senkrecht zum Magnetfeld fliegenden Elektronen wirkt die Lorentzkraft  $F_L$ :

$$F_L = e \cdot v \cdot B$$

$v$ : Geschwindigkeit des Elektrons

$B$ : Stärke des Magnetfelds in  $\text{V s m}^{-2}$

Die Elektronen werden durch das Magnetfeld auf eine Kreisbahn mit Radius  $r$  gezwungen, die Lorentzkraft  $F_L$  und die Zentrifugalkraft  $F_Z$  stehen im Gleichgewicht:

$$F_L = F_Z$$

Durch Einsetzen der obigen Gleichungen kann nun die spezifische Elektronenladung  $\frac{e}{m_e}$  berechnet werden:

$$\begin{aligned} e \cdot v \cdot B &= \frac{m_e \cdot v^2}{r} \\ e \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m_e}} \cdot B &= \frac{m_e \cdot 2 \cdot e \cdot U}{r \cdot m_e} \\ \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m_e}} &= \frac{2 \cdot U}{r \cdot B} \\ \frac{2 \cdot e \cdot U}{m_e} &= \frac{4 \cdot U^2}{r^2 \cdot B^2} \\ \frac{e}{m_e} &= \frac{2 \cdot U}{r^2 \cdot B^2} \end{aligned}$$

Für die Stärke des zwischen den Helmholtzspulen herrschenden, nahezu homogenen Magnetfeldes gilt:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot R^2 \cdot I}{(R^2 + a^2)^{3/2}}$$

$\mu_0$ : magnetische Feldkonstante

$N$ : Windungszahl der Spule (124)

$R$ : Spulenradius (0,15 m)

$a$ : halber Spulenabstand (0,075 m)

$I$ : gemessener Strom durch die Spule

Durchzuführende Messungen:

1. Radius  $r$  der Elektronenbahn bei festem  $I$  (konstantes Magnetfeld) für verschiedene  $U$  (verschiedene Elektronengeschwindigkeiten)
2. Radius  $r$  der Elektronenbahn bei festem  $U$  für verschiedene  $I$

Aufgabe:

- a) Bestimmt die spezifische Ladung  $e/m_e$  (inkl. Fehlerrechnung).
- b) Vergleicht euer Ergebnis mit dem Literaturwert.
- c) Muss die relativistische Massenzunahme der Elektronen berücksichtigt werden ?

### 11.3.2 Naturkonstanten

Erdbeschleunigung  $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$

Elektronenmasse  $m_e = 9.1094 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

elektrische Elementarladung  $e = 1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ A s}$

magnetische Feldkonstante  $\mu_0 = 1.2566 \cdot 10^{-6} \text{ V s m}^{-1} \text{ A}^{-1}$

spezifische Elektronenladung  $\frac{e}{m_e} = 1.7588 \cdot 10^{11} \text{ A s kg}^{-1}$

wichtige Einheiten-Umrechnung:  $\text{m}^2 = \frac{\text{A s}^3 \text{V}}{\text{kg}}$

# Kapitel 12

## Das Millikan-Experiment

### 12.1 Motivation

Im Jahre 1910 gelang es Robert Andrews Millikan, die elektrische Elementarladung zu bestimmen und die Quantisierung der elektrischen Ladung nachzuweisen. Er beobachtete hierfür die Bewegung kleiner, elektrisch geladener Öltröpfchen im homogenen elektrischen Feld eines Plattenkondensators. Aus der Steig- und Sinkgeschwindigkeit der Tröpfchen konnte er die Ladung bestimmen. Für diese Leistung erhielt er 1923 den Nobelpreis für Physik. In unserem Experiment wollen wir mit der gleichen Methodik die Elementarladung bestimmen, und daraus mit Hilfe der Ergebnisse des Lorentzkraftexperiments die Masse des Elektrons berechnen.

### 12.2 Theoretischer Hintergrund

Auf ein mit der elektrischen Ladung  $Q$  geladenes Öltröpfchen mit Radius  $r$  wirken im homogenen elektrischen Feld eines Plattenkondensators folgende Kräfte:

**Gewichtskraft  $F_G$**

$$F_G = m_{\text{Öl}} \cdot g = \rho_{\text{Öl}} \cdot V \cdot g = \rho_{\text{Öl}} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot g \quad (12.1)$$

Hierbei bezeichnen  $g$  die Erdbeschleunigung und  $\rho_{\text{Öl}}$  die Dichte des verwendeten Öls.

**Auftriebskraft  $F_A$**

$$F_A = m_{\text{Luft}} \cdot g = \rho_{\text{Luft}} \cdot V \cdot g = \rho_{\text{Luft}} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot g \quad (12.2)$$

Die Auftriebskraft wirkt der Gewichtskraft  $F_G$  entgegen, sie entspricht der Gewichtskraft der durch das Öltröpfchen verdrängten Luftmenge. Daraus resultiert die

**effektive Gewichtskraft  $F_{G,\text{eff}}$**

$$F_{G,\text{eff}} = F_G - F_A = (m_{\text{Öl}} - m_{\text{Luft}}) \cdot g = (\rho_{\text{Öl}} - \rho_{\text{Luft}}) \cdot V \cdot g = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot g \quad (12.3)$$

**elektrische Kraft  $F_E$** 

$$F_E = Q \cdot E = Q \cdot \frac{U}{d} \quad (12.4)$$

Hierbei bezeichnen  $d$  den Abstand der Kondensatorplatten und  $U$  die angelegte Spannung. Bewegt sich das Öltröpfchen in Luft mit der Geschwindigkeit  $v$ , dann wirkt zusätzlich noch, entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung, eine geschwindigkeitsabhängige

**Stokes'sche Reibungskraft  $F_R$** 

$$F_R = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \quad (12.5)$$

Hierbei bezeichnet  $\eta$  die Viskosität von Luft. Die Reibungskraft ist auch dafür verantwortlich, dass nach einer kurzen Beschleunigungsphase die Tröpfchen entweder mit einer konstanten Geschwindigkeit steigen oder fallen. Der obige Ansatz für die Reibungskraft liefert für den verwendeten Versuchsaufbau jedoch systematisch nicht die korrekten Ergebnisse für die Ladung  $Q$  der Tröpfchen. Dies liegt daran, dass die Stokes'sche Reibungskraft in obiger Form nur dann benutzt werden darf, wenn die Tröpfchen groß sind im Vergleich zu der mittleren freien Weglänge der Luftmoleküle, die die Tröpfchen umgeben. Dies ist im vorliegenden Fall nicht gegeben. Daher muss die Stokes'sche Reibungskraft modifiziert werden. Mit Hilfe der sogenannten Cunningham-Korrektur ergibt sich für das Stokes'sche Gesetz in abgewandelter Form:

$$F_R = \frac{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v}{1 + \frac{b}{p \cdot r}} = \frac{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v}{1 + \frac{a}{r}} \quad (12.6)$$

mit  $b = 8 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{hPa}$  und dem Umgebungsluftdruck  $p$  ( $p = 1.013,25 \text{ hPa}$ ).  $b$  und  $p$  sind strenggenommen von den jeweiligen Umgebungsbedingungen abhängig. Für die Auswertung sollen jedoch die angegebenen Werte verwendet werden. Im Folgenden wird weiterhin  $a = b/p = \text{const.}$  gesetzt. Befinden sich die Kräfte im Gleichgewicht, dann sinkt oder steigt das Tröpfchen mit konstanter Geschwindigkeit. D.h. im Gleichgewichtsfall ist die Summe der Kräfte, die auf das Tröpfchen wirken, gleich Null. Liegt am Plattenkondensator keine Spannung  $U$  an, sinkt das Tröpfchen. Im Kräftegleichgewicht bei konstanter Sinkgeschwindigkeit  $v_{\text{sink}}$  gilt dann

$$F_{G,\text{eff}} - F_R = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \rho \cdot g \cdot r^3 - \frac{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v_{\text{sink}}}{1 + \frac{a}{r}} = 0 \quad (12.7)$$

Indem man die konstante Sinkgeschwindigkeit  $v_{\text{sink}}$  misst, kann man daraus den Radius des Öltröpfchens bestimmen:

$$r = -\frac{a}{2} + \sqrt{\frac{a^2}{4} + \frac{9}{2} \frac{\eta}{\rho \cdot g} \cdot v_{\text{sink}}} \quad (12.8)$$

Um die Ladung  $Q$  des Tröpfchens zu bestimmen, wird an den Plattenkondensator eine Spannung  $U$  angelegt, das Tröpfchen steigt mit konstanter Steiggeschwindigkeit  $v_{\text{steig}}$ . Es gilt für die Kräfte

$$F_{G,\text{eff}} + F_R - F_E = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \rho \cdot g \cdot r^3 + \frac{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v_{\text{steig}}}{1 + \frac{a}{r}} - Q \frac{U}{d} = 0 \quad (12.9)$$

Nach  $Q$  aufgelöst und mit dem Radius  $r$  aus Gleichung 12.8 ergibt sich

$$Q = \frac{3 \cdot d \cdot \pi \cdot \eta \cdot \left( a - \sqrt{a^2 + \frac{18\eta}{g \cdot \rho} \cdot v_{\text{sink}}} \right)^2}{U \cdot \left( a + \sqrt{a^2 + \frac{18\eta}{g \cdot \rho} \cdot v_{\text{sink}}} \right)} (v_{\text{sink}} + v_{\text{steig}}) \quad (12.10)$$

Durch Messung der Steig- und Sinkgeschwindigkeit und der angelegten Spannung kann die elektrische Ladung  $Q$  eines Tröpfchens bestimmt werden. Gleichung 12.10 lässt sich noch vereinfachen mittels folgender Terme, die für die Versuchsanordnung wie wir sie benutzen gelten:

$$3 \cdot d \cdot \pi \cdot \eta = C1 = 1,023 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (12.11)$$

$$\frac{18\eta}{g \cdot \rho} = C2 = 3,8 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s} \quad (12.12)$$

$$a = 7,89 \cdot 10^{-8} \text{ m} \quad (12.13)$$

Damit ergibt sich für die Ladung

$$Q = \frac{C1 \cdot \left( a - \sqrt{a^2 + C2 \cdot v_{\text{sink}}} \right)^2}{U \cdot \left( a + \sqrt{a^2 + C2 \cdot v_{\text{sink}}} \right)} (v_{\text{sink}} + v_{\text{steig}}) \quad (12.14)$$

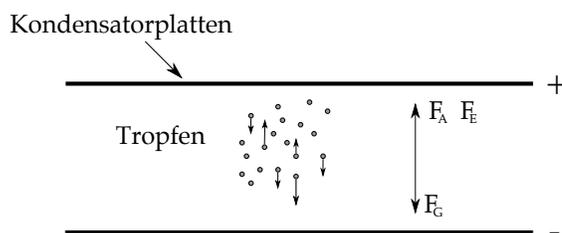


Abbildung 12.1: links: Schematische Darstellung des Millikanversuchs. Die Öltröpfchen bewegen sich je nach angelegter Spannung  $U$  zwischen den beiden Kondensatorplatten nach oben und unten. rechts: Versuchsanordnung. Über die orange Handpumpe werden Öltröpfchen in den mittig zu sehenden Plattenkondensator gebracht und mittels des Mikroskopes beobachtet. Rechts ist die LED Lampe zu erkennen, die für die Beleuchtung für die Dunkelfeldmessmethode sorgt.

## 12.3 Durchführung

Mit Hilfe des Ölzerstäubers werden Tröpfchen in den Plattenkondensator eingebracht (Abb. 12.1). Da die Tröpfchen aneinander oder an der umgebenden Luft reiben, werden manche Tröpfchen elektrisch geladen. Der Blick durchs Okular des Messmikroskopes in den Plattenkondensator zeigt sehr viele Tröpfchen, die Schärfeebene kann variiert werden. Die Tröpfchen werden unter einem Winkel von etwa  $150^\circ$  beleuchtet, gegen den dunklen Hintergrund sehen wir die entstehenden Beugungsscheibchen. Die Tröpfchen selbst sind mit etwa 500 nm Durchmesser zu klein um sie direkt zu sehen. Liegt keine Spannung an, so sinken die Tröpfchen ab. Wird nun eine Spannung (etwa 500 V) angelegt, so beginnen einzelne Tröpfchen aufzusteigen. Ausschließlich diese sind für unsere Messungen geeignet. Wählt ein Tröpfchen aus und misst die konstante Sink- und Steiggeschwindigkeit. Zwei Großstriche der Skala im Okular entsprechen 0,5 Millimeter Strecke, die Zeit wird direkt an der Apparatur gestoppt. Wiederholt die Messung für etwa zehn verschiedene Tröpfchen.

Die meisten der geladenen Tröpfchen sind einfach elektrisch geladen, einige aber auch mehrfach. Woran erkennt ihr diese? Sucht gezielt nach mehrfach geladenen und misst auch davon welche aus. Tragt eure Messwerte in eine Tabelle ein, die etwa so aussieht:

#	Fallstrecke [mm]	Fallzeit [s]	Steigstrecke [mm]	Steigzeit [s]	Spannung [V]
1					
2					

## 12.4 Auswertung

- Berechnet Radius  $r$  und Ladung  $Q$  der beobachteten Tröpfchen
- Tragt die berechneten Werte für  $Q$  in einem Histogramm auf: x-Achse ist die Ladung in Einheiten von  $10^{-19}$  C, y-Achse ist die Häufigkeit. In diesem Histogramm erkennt ihr, dass die elektrische Ladung nicht beliebig, sondern quantisiert ist, also nur in Vielfachen der Elementarladung vorkommt. Wie groß ist folglich die Elementarladung  $e$ ?
- Berechnet nun mit Hilfe eurer Ergebnisse aus dem zweiten Experiment, wo ihr die spezifische Ladung  $e/m_e$  bestimmt habt, die Masse  $m_e$  des Elektrons.
- Vergleicht eure Ergebnisse für Elementarladung  $e$  und Masse  $m_e$  mit den Literaturwerten.

### Nützliche Konstanten

Viskosität von Luft	$\eta$	=	$1,81 \cdot 10^{-5}$ Ns/m <sup>2</sup>
Dichte Öl	$\rho_{\text{Öl}}$	=	1030 kg/m <sup>3</sup>
Dichte Luft	$\rho_{\text{Luft}}$	=	1,29 kg/m <sup>3</sup>
Erdbeschleunigung	$g$	=	9,81 m/s <sup>2</sup>
elektr. Elementarladung	$e$	=	$1,6022 \cdot 10^{-19}$ C
Plattenabstand	$d$	=	$6 \cdot 10^{-3}$ m

# Kapitel 13

## Radioaktivität

### 13.1 Aufbau des Atoms

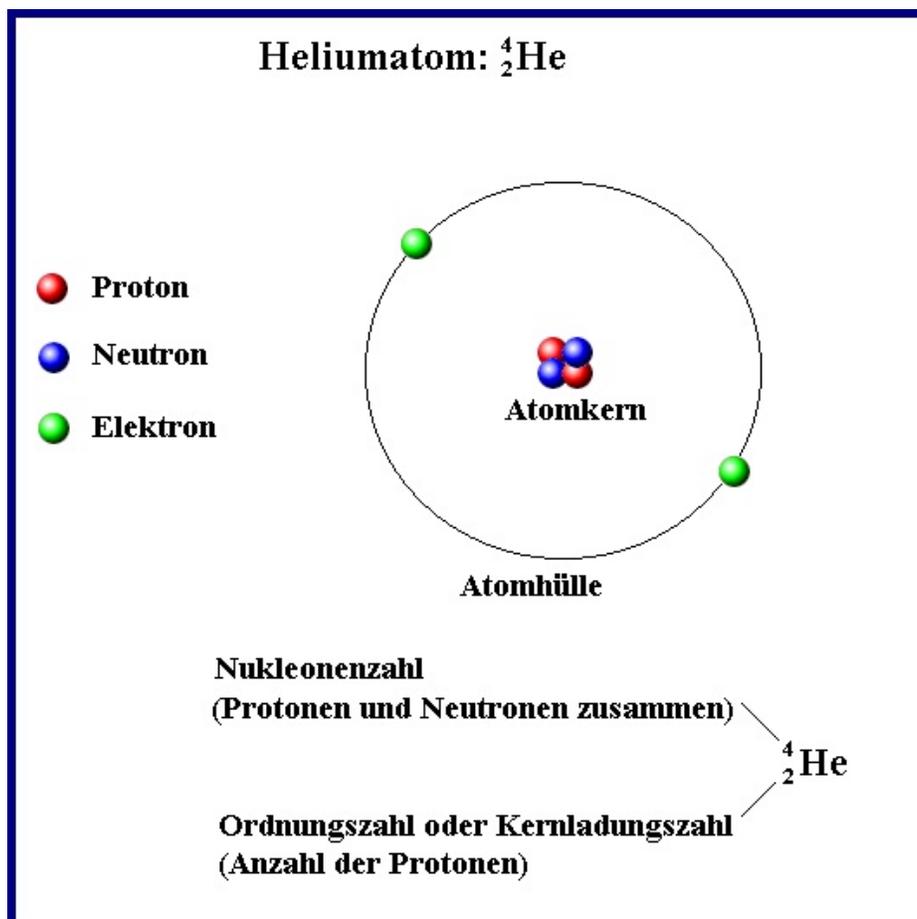


Abbildung 13.1: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Atoms am Beispiel des Heliums. (Quelle: hpwt.de)

## 13.2 Radioaktive Zerfälle

### 13.2.1 $\alpha$ -Zerfall

- ein  $\alpha$ -Teilchen (2 Protonen + 2 Neutronen) wird aus dem Atomkern abgestrahlt, es entsteht ein neues Element mit einer um 2 niedrigeren Kernladungszahl (Abb. 13.2)
- es durchdringt die Coulomb-Barriere mittels Tunneleffekt
- Voraussetzung: es muss sich im Kern ein  $\alpha$ -Teilchen mit der nötigen Energie bilden, erst dann gibt es eine gewisse Wahrscheinlichkeit für einen  $\alpha$ -Zerfall
- die meisten  $\alpha$ -Strahler sind schwerer als Blei (neutronenreich)

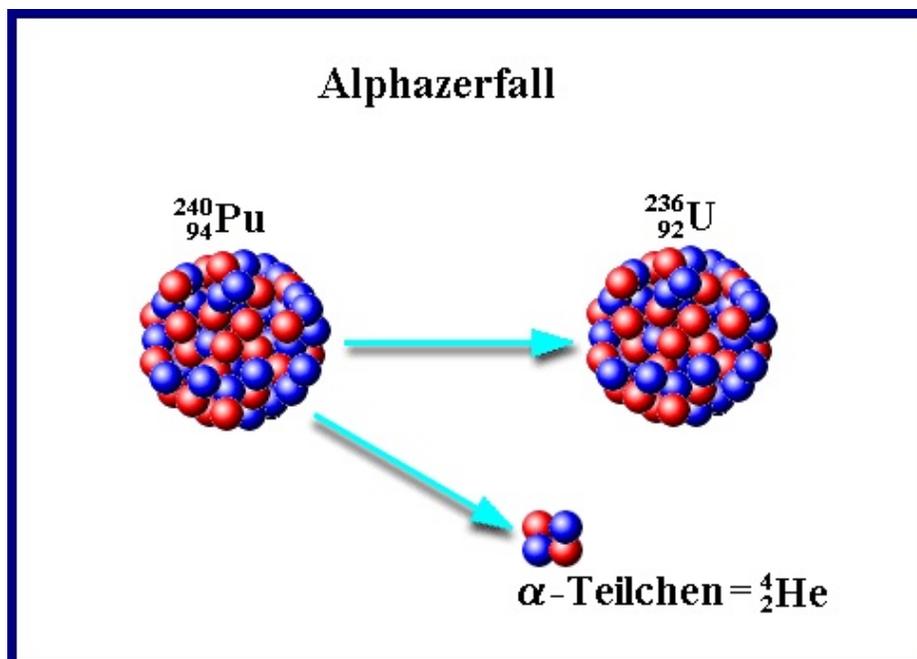


Abbildung 13.2: Schematische Darstellung des  $\alpha$ -Zerfalls. (Quelle: hpwt.de)

### 13.2.2 $\beta$ -Zerfall

- es gibt zwei Arten von  $\beta$ -Zerfällen (Abb. 13.3):  
 $\beta$ -minus-Zerfall:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$   
 $\beta$ -plus-Zerfall:  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
- es entsteht jeweils ein neues Element mit einer um 1 höheren bzw. niedrigeren Kernladungszahl
- Kern mit der kleinsten Masse in einem Isobarenspektrum (verschiedene Elemente mit derselben Massenzahl) ist stabil: höchste Bindungsenergie

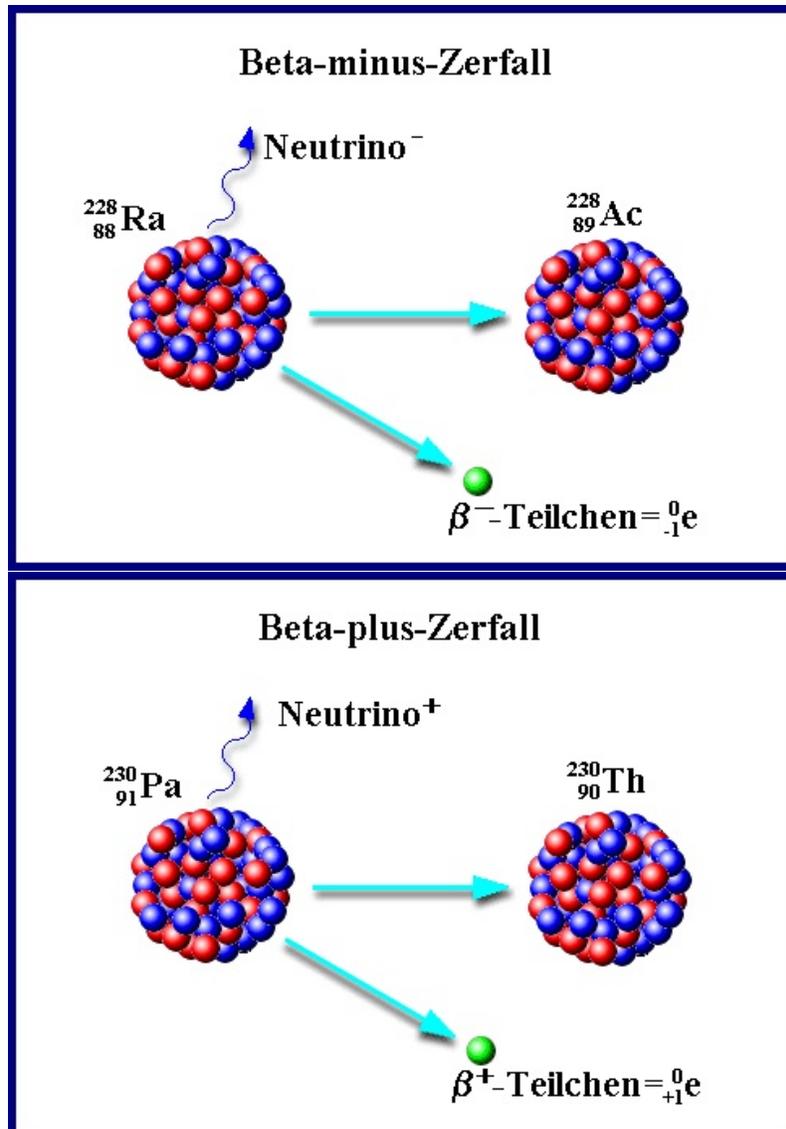


Abbildung 13.3: Schematische Darstellung des  $\beta$ -Zerfalls. (Quelle: hpwt.de)

### 13.2.3 $\gamma$ -Zerfall

- nach einem  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Zerfall befindet sich der entstandene Atomkern meist in einem energetisch angeregten Zustand. Durch Aussenden energiereicher  $\gamma$ -Strahlung regt er sich in den Grundzustand ab
- die Protonen- und Neutronenzahl des Kerns bleiben erhalten
- $\gamma$ -Strahlung ist keine Teilchenstrahlung, sondern elektromagnetische Wellen

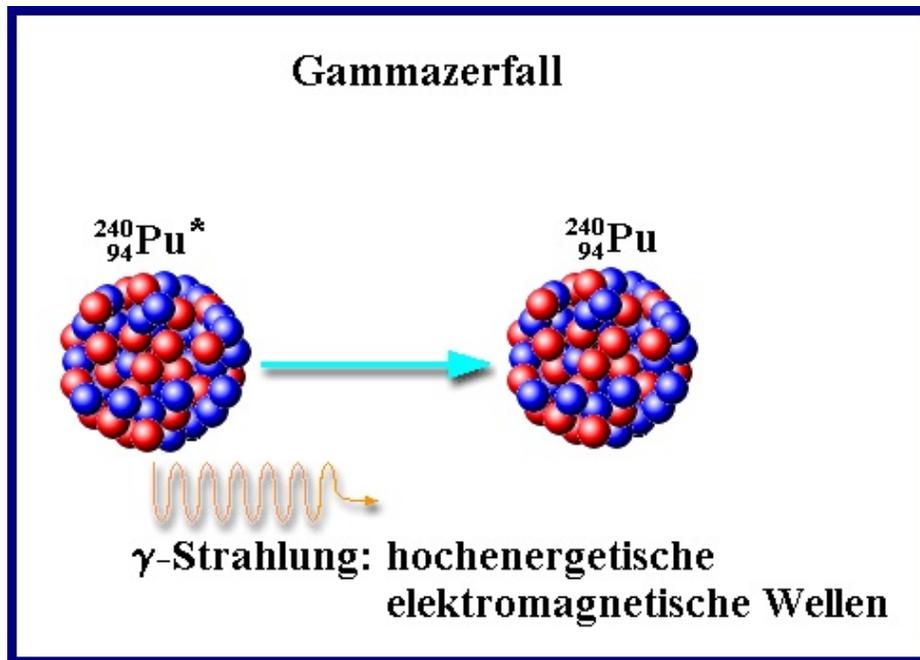


Abbildung 13.4: Schematische Darstellung des  $\gamma$ -Zerfalls. (Quelle: hpwt.de)

### 13.2.4 Zerfallsgesetz

Nach der Zeit  $t$  sind von ursprünglich ( $t = 0$ )  $N_0$  Nukliden noch übrig:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Hierbei bezeichnet  $\lambda$  die Zerfallskonstante, mit ihr ergibt sich für die mittlere Lebensdauer

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad \rightarrow \quad N(\tau) = N_0 e^{-1}$$

und für die Halbwertszeit

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad \rightarrow \quad N(T_{\frac{1}{2}}) = \frac{1}{2} N_0$$

In Tab. 13.1 sind die Halbwertszeiten einiger ausgewählter radioaktiver Isotope aufgelistet. Sie reichen von wenigen Tagen bis zu vielen Milliarden Jahren.

Die Aktivität  $A$  ist die Anzahl der Zerfälle pro Zeit:

$$A(t) = \frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

Die Einheit der Aktivität ist Becquerel.

Die Energiedosis, die die in Materie absorbierte Strahlenmenge beschreibt, hat die Einheit Gray (Gy). Die Äquivalentdosis beschreibt die Strahlenmenge, wenn zusätzlich ihre biologische Wirkung berücksichtigt wird. Sie hat die Einheit Sievert (Sv). Die jährliche Strahlenbelastung in Deutschland durch natürliche und künstliche Quellen beträgt etwa 4 mSv. Akute Strahlenschäden treten bereits bei einer kurzzeitig (wenige Minuten) einwirkenden Äquivalentdosis von 250 mSv, bezogen auf den ganzen Körper, auf. Die lethale (tödliche) Strahlendosis für den Menschen liegt bei etwa 7 Sv.

Tabelle 13.1: Halbwertszeiten einiger radioaktiver Isotope

$^{222}\text{Rn}$	3,8 Tage	$^{226}\text{Ra}$	1 600 Jahre	$^{235}\text{U}$	700 Mio. Jahre
$^{131}\text{J}$	8 Tage	$^{14}\text{C}$	5 730 Jahre	$^{40}\text{Ka}$	1,3 Mrd. Jahre
$^{137}\text{Cs}$	30 Jahre	$^{239}\text{Pu}$	24 000 Jahre	$^{238}\text{U}$	4,5 Mrd. Jahre

### 13.3 Quellen radioaktiver Strahlung

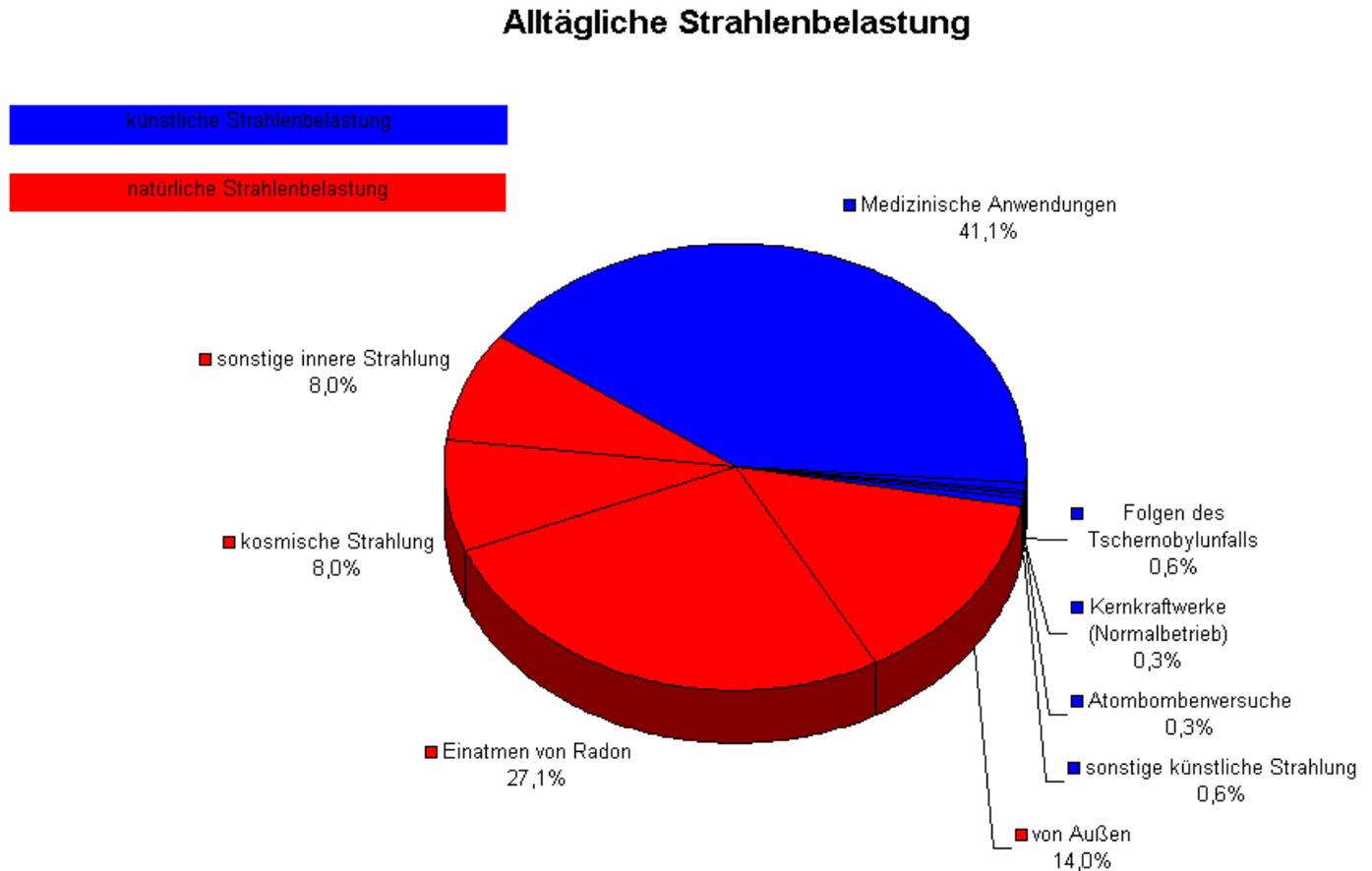


Abbildung 13.5: Natürliche und künstliche Strahlungsquellen. (Quelle: wikimedia.org)

- Wir nehmen durch die Nahrung Kalium zu uns, darunter auch  $^{40}\text{K}$ , das im Körper zerfällt und uns von innen verstrahlt.  $^{238}\text{U}$  im Boden zerfällt in  $^{222}\text{Rn}$ , das sich vor allem im Keller von Gebäuden anreichert und durch die Atemluft aufgenommen wird.
- Der Großteil der künstlichen Radioaktivität in der Umwelt stammt von ehemaligen Kernwaffentests, Reaktorunfällen wie Tschernobyl und der Kernindustrie. Die Hauptbelastung für den Menschen sind jedoch medizinische Anwendungen (z.B. Röntgen).

## 13.4 Wechselwirkung mit Materie

- $\alpha$ -Teilchen wechselwirken beim Durchgang durch Materie durch Anregung oder Ionisation der Materie, das  $\alpha$ -Teilchen wird dabei verlangsamt. Das freigesetzte Elektron kann zu Sekundärionisation führen. In Luft hat ein  $\alpha$ -Teilchen nach etwa 7 cm keine Energie mehr um zu ionisieren, es fängt aus der Umgebung zwei Elektronen ein und wird zu einem Heliumatom.
- Der Durchgang von  $\beta$ -Strahlung durch Materie führt ebenfalls zu Anregung und Ionisation der Materie.  $\beta$ -Strahlen müssen allerdings einen deutlich längeren Weg zurücklegen, um ihre Energie abzugeben, ihre Eindringtiefe ist deshalb deutlich tiefer. In Luft kann energiereiche  $\beta$ -Strahlung durchaus einige Meter weit kommen.

Ein  $\beta$ -Teilchen kann außerdem im elektrischen Feld eines Atoms abgebremst werden. Hierbei strahlt es energiereiche Röntgenbremsstrahlung ab. Dieser Effekt wird benutzt, um Röntgenstrahlung zu erzeugen.

- Neutronenstrahlung kann beim Durchgang durch Materie nicht mit der Atomhülle wechselwirken, es kommt deshalb nicht direkt zu Ionisation oder Anregung. Allerdings kann ein Neutron durch eine direkte Kollision mit einem Atomkern des Absorbers diesen Kern anregen, der sich durch Aussenden von  $\gamma$ -Strahlung wieder abregt. Im Extremfall kann ein Atomkern durch ein stoßendes Neutron vollständig aus einem Molekül herausgelöst werden und anschließend selbst weitere Atome ionisieren.
- $\gamma$ -Strahlung wechselwirkt vor allem durch drei Prozesse mit Materie (Abb. 13.6):
  - Photoeffekt: das  $\gamma$ -Quant wird von einem Atom des Absorbermaterials vollständig absorbiert, dabei wird das Atom ionisiert. Das freigesetzte Elektron (Photoelektron) kann seinerseits wieder Atome in seiner Nähe anregen oder ionisieren.
  - Comptoneffekt: das  $\gamma$ -Quant wird an einem Atom des Absorbermaterials gestreut, es gibt einen Teil seiner Energie ab und ionisiert das Atom. Das freigesetzte Elektron (Comptonelektron) kann seinerseits wieder Atome in seiner Nähe anregen oder ionisieren. Das  $\gamma$ -Quant fliegt weiter und kann weitere Comptoneffekte bewirken, bis es genug Energie abgegeben hat um durch Photoeffekt absorbiert zu werden.
  - Paarbildung: Im Feld eines Atomkerns des Absorbermaterials wandelt sich ein hochenergetisches ( $E > 1,022 \text{ MeV}$ )  $\gamma$ -Quant in ein Elektron-Positron-Paar um. Das entstandene Positron vereinigt sich mit einem Elektron wieder in ein  $\gamma$ -Quant.

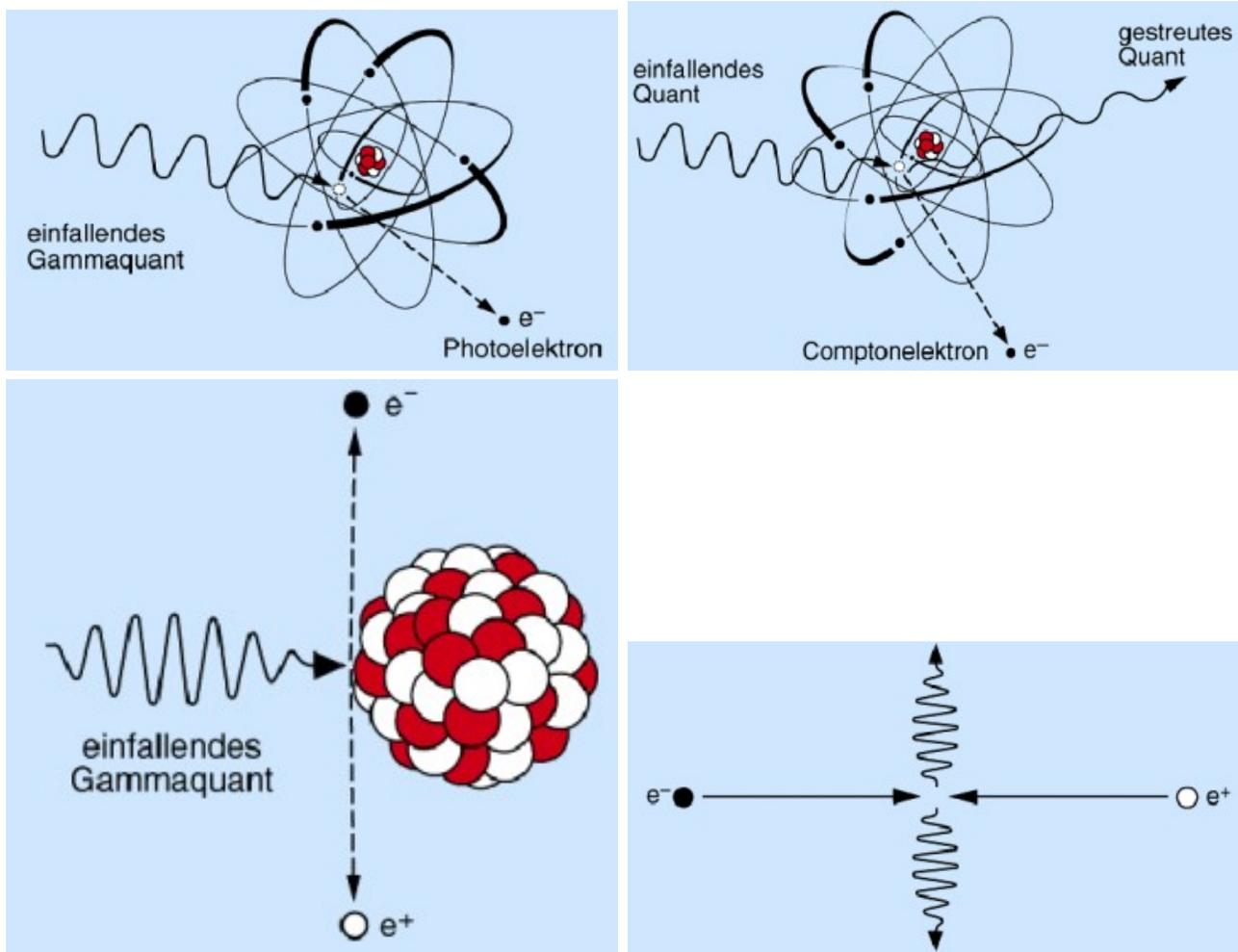


Abbildung 13.6: Wechselwirkung von  $\gamma$ -Strahlung mit Materie. (Quelle: zw-jena.de)

- Eindringtiefe geladener Teilchenstrahlung:  
Für Elektronen wird die Schichtdicke  $d_{\max}^{\beta}$  definiert, in der 98% der eindringenden Teilchen ihre Energie verloren haben. Bei einer Anfangszählrate  $n_0$  gilt dann:

$$n(d_{\max}^{\beta}) = \frac{1}{50} n_0$$

Die gemessene Zählrate ist also auf  $\frac{1}{50} = 2\%$  der anfänglichen Rate abgefallen.

- Absorption von elektromagnetischer Strahlung:  
Die anfängliche Intensität  $I_0$  elektromagnetischer Strahlung wird beim Durchgang durch Materie entlang der Wegstrecke  $x$  entsprechend dem Absorptionsgesetz abgeschwächt:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

Hierbei ist  $\mu$  der lineare Schwächungskoeffizient, mit dessen Hilfe sich eine Halbwertsdicke  $d_{\frac{1}{2}}$  definieren lässt:

$$d_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

In das Absorptionsgesetz als Wegstrecke  $x$  eingesetzt ergibt sich

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-\mu \frac{\ln 2}{\mu}} = I_0 e^{-\ln 2} = I_0 \frac{1}{e^{\ln 2}} = \frac{1}{2} I_0$$

Nach Zurücklegen einer Wegstrecke entsprechend der Halbwertsdicke ist die Intensität also auf die Hälfte des anfänglichen Wertes gesunken.

## 13.5 Schutz vor radioaktiver Strahlung

- Hinweisschilder (Abb. 13.7) beachten!
- Wichtigste Regel: Abstand halten zu radioaktiven Quellen!
- Zweitwichtigste Regel: Sich nur kurze Zeit radioaktiver Strahlung aussetzen!
- $\alpha$ -Strahlung kann bereits durch ein Blatt Papier aufgehalten werden, dringt also nicht durch die Haut, Abschrubben der oberen Hautschicht hilft bei Verstrahlung.
- $\beta$ -Strahlung kann durch die oberen Hautschichten dringen, wird aber durch entsprechende Kleidung abgeschirmt (Augenschutz nicht vergessen!).
- $\gamma$ -Strahlung dringt mühelos durch Kleidung in den Körper ein, sie kann nur durch dicke Materialien erfolgreich abgeschirmt werden, z.B. mehrere Zentimeter dicke Bleiplatten.
- Innere Verstrahlung ist am gefährlichsten, deshalb darauf achten, nichtverstrahlte Nahrung und Getränke zu sich zu nehmen, das Einatmen von radioaktivem Staub vermeiden.
- Durch das Essen von Jod-Tabletten wird inaktives Jod in der Schilddrüse eingelagert. Dies verhindert die Aufnahme von radioaktivem Jod.



Abbildung 13.7: Internationale Warnzeichen für Radioaktivität

## 13.6 Geiger-Müller-Zählrohr

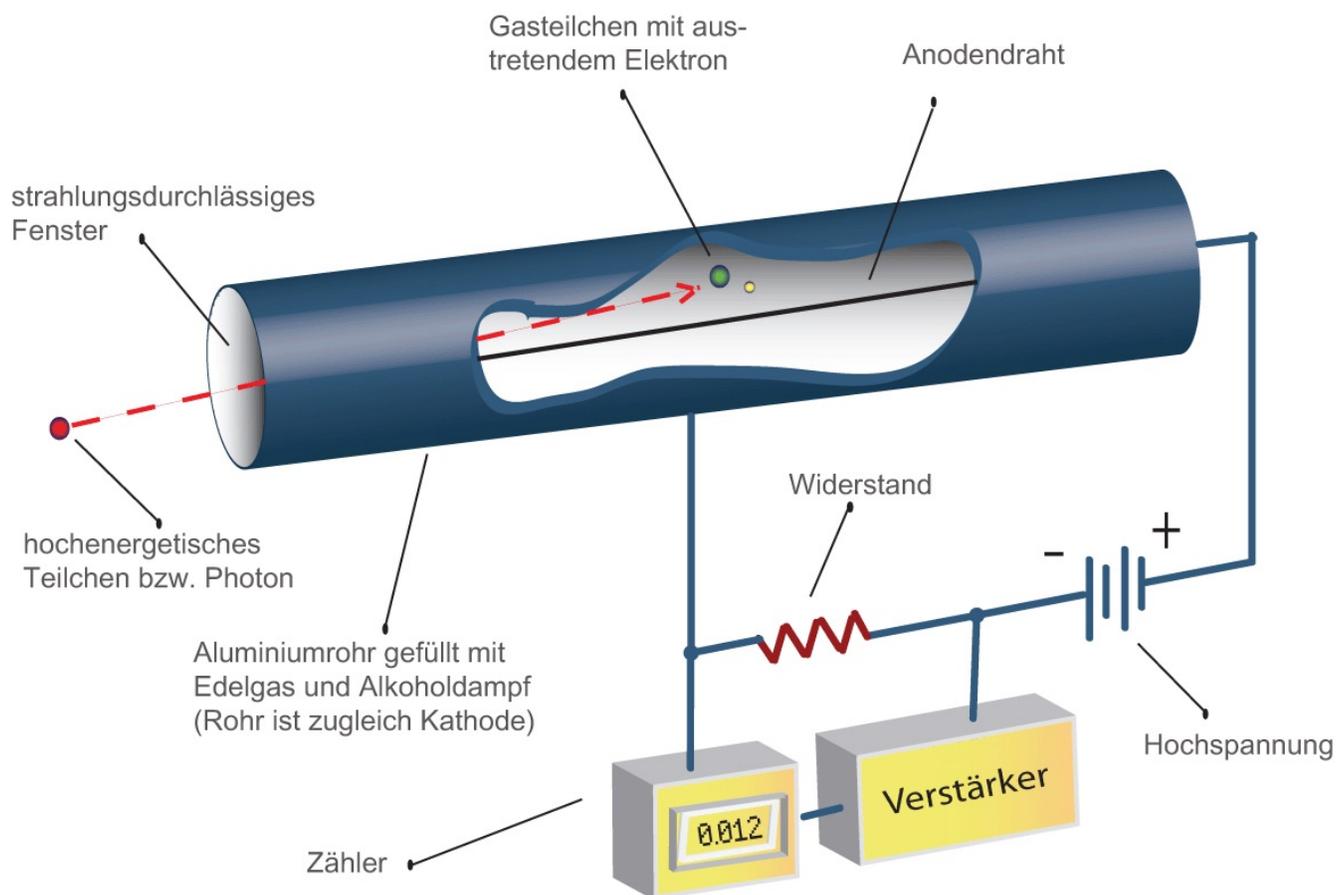


Abbildung 13.8: Schema eines Geiger-Müller-Zählrohres

**Funktionsweise eines Geiger-Müller-Zählrohres (Abb. 13.8):**

- Tritt radioaktive Strahlung durch das Eintrittsfenster in das Zählrohr ein, wechselwirkt die Strahlung mit den Gasteilchen und erzeugt Elektron-Ionpaare. Durch die unterschiedliche Spannung an Rohrwand (Kathode) und Anodendraht werden die Ladungspaare getrennt. Auf ihrem Weg zur Anode bzw. Kathode lösen sie ihrerseits durch Stöße mit den Gasteilchen weitere Ionisationen aus (Ladungsträgerlawine). Durch Messen der Detektorspannung kann man die Zählrate bestimmen.
- Nach der Detektion eines Signals muss zuerst die Spannungsänderung wieder abgeklungen sein, bevor das nächste Ereignis gemessen werden kann. Diese Zeitdauer, während der nicht gemessen werden kann, nennt man Totzeit  $\tau_0$ . Die gemessene Zählrate  $n_{\text{mess}}$  (Anzahl der Ereignisse pro Sekunde) kann korrigiert werden:

$$n_{\text{korr}} = \frac{n_{\text{mess}}}{1 - n_{\text{mess}} \cdot \tau_0}$$

- Es ist außerdem zu beachten, dass ein Geiger-Müller-Zähler unterschiedlich empfindlich für  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung ist.
  - Je nach Material des Eintrittsfensters wird  $\alpha$ -Strahlung unter Umständen vollständig blockiert.
  - $\gamma$ -Strahlung wechselwirkt nur in einem schmalen Energiebereich über Ionisation mit den Atomen des Füllgases und löst deshalb nur selten eine Ladungsträgerlawine aus. Die Nachweiswahrscheinlichkeit für  $\gamma$ -Strahlung liegt bei etwa 1%.

## 13.7 Experiment und Auswertung

Ziel des Versuches ist die Bestimmung der Reichweite ionisierender Strahlung in Materie am Beispiel der  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung. Als radioaktive Quelle verwenden wir Cäsium  ${}^{137}_{55}\text{Cs}$ , das in stabiles Barium  ${}^{137}_{56}\text{Ba}$  zerfällt. Der Hauptzerfallskanal (95%) ist zweistufig: zuerst ein  $\beta$ -Zerfall in angeregtes Barium, das sich im zweiten Schritt durch Aussenden von  $\gamma$ -Strahlung abregt. Es entstehen somit in gleicher Zahl Elektronen und  $\gamma$ -Quanten, wobei wir den Nebenzerfallskanal vernachlässigen. Für die Totzeit des Detektors nehmen wir  $\tau_0 = 60 \mu\text{s}$  an.

**Wichtig:** Niemals in die Messkammer, in der sich die radioaktive Quelle befindet, fassen, die Öffnung stets mit dem Bleideckel verschlossen halten. Sollte etwas hineinfallen, nicht darin herumstochern.

### Durchführung

1. Zuerst müssen wir eine Kalibration durchführen, um die Triggerschwelle des Geiger-Müller-Zählers festzulegen. Die 30 mm Bleiabschirmung einsetzen und eine Zählrate von etwa einem Ereignis pro Sekunde durch vorsichtiges Regeln der Triggerschwelle einstellen. Eine Minute lang messen und genaue Zählrate bestimmen.
2. Für 10 verschiedene Aluminiumabschirmungen die Zahl der Ereignisse  $N_{\text{mess}}$  etwa 60 s lang messen, exakt gemessene Zeit notieren, Zählrate  $n_{\text{mess}}$  bestimmen.
3. Für 10 verschiedene Bleiabschirmungen die Zahl der Ereignisse  $N_{\text{mess}}$  etwa 120 s lang messen, exakt gemessene Zeit notieren, Zählrate  $n_{\text{mess}}$  bestimmen.
4. Tragt die Messungen am besten in eine Tabelle folgender Form ein:

Schichtdicke $x$ in mm	Messzeit $t$ in s	$N_{\text{mess}}$	$n_{\text{mess}}$ in 1/s
15	60	1337	22,283

## Analyse

1. Berechnet für die Messreihe mit Aluminiumabschirmung die korrigierte Zählrate  $n_{\text{kor}}_i$  bei einer Totzeit  $\tau_0 = 60 \mu\text{s}$ . Bei der Bleiabschirmung ist die Zählrate so gering und damit der zeitliche Abstand zwischen zwei Ereignissen so gross, dass die Totzeit nicht korrigiert werden muss.
2. Fertigt für beide Messreihen jeweils ein Diagramm an, wobei ihr  $\ln\left(\frac{n_i}{n_0}\right)$  (y-Achse) gegen die Schichtdicke  $x$  (x-Achse) aufträgt.  $n_0$  ist hierbei die korrigierte Zählrate der jeweils ersten Messung. Es ist sinnvoll, diese Diagramme von Hand auf Millimeterpapier zu zeichnen, weil ihr mit Excel für die weiteren Schritte vermutlich nicht sehr weit kommen werdet.
3. Aluminiumabschirmung:
  - Ihr erkennt einen deutlichen Knick im Verlauf der Messkurve. Legt durch beide Abschnitte der Kurve jeweils eine Gerade. Wieso ändert sich die Zählrate so abrupt?
  - Bestimmt die max. Eindringtiefe  $d_{\text{max}}^\beta$  für Elektronen in Aluminium anhand der steilen Geraden durch Interpolation bei  $y = \ln \frac{1}{50}$ .
  - Bestimmt die Halbwertsdicke  $d_{\frac{1}{2}}^\gamma$  für  $\gamma$ -Strahlung in Aluminium anhand der flachen Geraden durch Interpolation bei  $y = \ln \frac{1}{2}$ .
  - Berechnet den Schwächungskoeffizienten  $\mu$  in Aluminium. Wie könnt ihr  $\mu$  aus eurem Graphen ablesen?
  - Der Geiger-Müller-Zähler weist nahezu alle Elektronen der  $\beta$ -Strahlung nach, jedoch nur einen Bruchteil der  $\gamma$ -Quanten. Wir gehen davon aus, dass beim Zerfall des Cäsiums gleichviele Elektronen wie  $\gamma$ -Quanten entstehen. Bestimmt aus der flachen Geraden die maximale Zählrate  $n_{\text{max}}^\gamma$  für  $\gamma$ -Quanten bei einer Schichtdicke  $x = 0 \text{ cm}$ . Berechnet damit die maximale Zählrate für Elektronen  $n_{\text{max}}^\beta = n_0 - n_{\text{max}}^\gamma$  und schließlich die Nachweiswahrscheinlichkeit für  $\gamma$ -Quanten im verwendeten Geiger-Müller-Zähler.
4. Bleiabschirmung:
  - Legt eine Gerade an den Verlauf eurer Messwerte an. Wieso können eure Messwerte durch eine einzige Gerade gefittet werden im Gegensatz zur Abschirmung mit Aluminium?
  - Bestimmt die Halbwertsdicke  $d_{\frac{1}{2}}^\gamma$  für  $\gamma$ -Strahlung in Blei durch Interpolation bei  $y = \ln \frac{1}{2}$ . Wie groß ist der Schwächungskoeffizient  $\mu$  in Blei?

# Kapitel 14

## Bau einer Nebelkammer

### 14.1 Motivation

Eine *Nebelkammer* ist ein einfach zu bauender Teilchendetektor zum Nachweis von ionisierender Strahlung, z.B.  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Strahlen. Man sieht hierbau die Spur, die die Teilchen bei ihrem Flug durch die Kammer hinterlassen. Mit etwas Glück kann man auch den Zerfall eines Muons beobachten.

In der Kammer herrscht ein übersättigter Dampfdruck eines Luft-Alkohol-Gemisches, z.B. mit Isopropanol oder Ethanol. Fliegt ein energiereiches geladenes Teilchen, z.B. ein  $\alpha$ -Teilchen, durch, stößt es an die Gasteilchen und ionisiert diese. Die gebildeten Ionen wirken als Kondensationskerne für die Bildung winziger Tröpfchen, ein kleiner Kondensstreifen entsteht entlang der Spur.

Die beobachteten Spuren können unterschiedlich dick sein.  $\alpha$ -Teilchen hinterlassen z.B. recht kurze aber dicke Kondensstreifen,  $\beta$ -Teilchen dagegen längere dünne. Neutronen und  $\gamma$ -Teilchen kann man nicht bzw. kaum nachweisen. Die detektierten  $\alpha$ - und  $\beta$ -Teilchen stammen aus der normalen Umgebung, z.B. dem Zerfall des Radons in der Luft. Oder stammen bei starken Sonneneruptionen aus dem Sonnenwind. Legt man ein radioaktives Präparat in die Kammer, ist der Effekt meist viel stärker als mit natürlicher Strahlung.

Bringt man zusätzlich ein magnetisches Feld an, kann man durch die Lorentzkraft die Teilchen auf eine gekrümmte Bahn zwingen, je nach Ladung fliegen sie dann in unterschiedliche Richtung in einer kreisförmigen Bahn.

## 14.2 Zusammenbau

Für unsere Nebelkammer brauchen wir folgende Materialien (siehe Abb. 14.1 und 14.2):

- Aquariumbehälter (30×20×20 cm) oder ähnliches
- Trockeneis (gefrorenes CO<sub>2</sub>), z.B. bei kleinen Lebensmittelläden erhältlich wenn sie Tiefkühlware geliefert bekommen



Abbildung 14.1: Trockeneis

- etwa 10 cm dicke Styroporplatte als Behälter für das Trockeneis
- Kupferplatte als Bodenplatte, eine Seite geschwärzt, etwas größer als das Aquarium
- Lampen, z.B. Kaltkathodenröhren
- Isopropanol oder Ethanol
- Watte pads oder ähnlich saugstarkes Material als Reservoir für den Alkohol
- dunkles Tuch zum Abdecken der Kammer
- radioaktives Präparat, z.B. Glühstrumpf
- alkoholresistenter Klebstoff



Abbildung 14.2: Materialsammlung für die Nebelkammer

Der Aufbau geht dann in diesen Schritten:

1. Styroporplatte 3 cm tief aushöhlen, etwa Grundriss des Aquariums
2. Wattedpads seitlich unten im Aquarium ankleben (nicht auf den Boden, sonst kann man nicht von oben reinschauen)
3. Isopropanol auf die Pads draufträufeln, Menge muss man ausprobieren
4. Trockeneis in den Styroporbehälter einfüllen, für gleichmäßige Oberfläche sorgen
5. Kupferplatte mit der schwarzen Seite nach oben drauf legen (lärmendes Geräusch entsteht beim Abkühlen)
6. Aquarium über Kopf, also mit dem Boden nach oben, auf die Kupferplatte stellen
7. seitlich auf Höhe der Kupferplatte Lampen anbringen, Aquarium mit Stoff abdunkeln
8. warten, bis sich im abgeschlossenen Aquarium ein übersättigter Dampf am Boden knapp oberhalb der sehr kalten Kupferplatte bildet
9. mit der Zeit sieht man Kondensationsspuren (einige cm lang) von radioaktiven Teilchen, insbesondere wenn man ein radioaktives Präparat mit rein getan hat



Abbildung 14.3: Die fertige Nebelkammer

# Kapitel 15

## Der elektrische Telegraph

### 15.1 Motivation

Der elektrische Telegraph ist eine der wichtigsten Erfindungen der letzten 200 Jahre. Er ist der direkte Vorgänger unserer heutigen digitalen Kommunikationsmittel. Im Jahre 1833 wurde von Wilhelm Weber und Carl Friedrich Gauß in Göttingen zum ersten Mal eine erfolgreiche (elektrische) telegraphische Nachrichtenübertragung durchgeführt. In den folgenden Jahren wurden die Apparate verbessert, u.a. von Samuel Morse, und verbreiteten sich, insbesondere entlang von Eisenbahnlinien. Wir wollen mit möglichst einfachen Mitteln einen voll funktionsfähigen Telegraphen bauen.

### 15.2 Das Morsealphabet

Das Morsealphabet wie wir es heute kennen, wurde im Laufe vieler Jahrzehnte entwickelt, den Anfang machte Samuel Morse 1833. Es wurde weiterentwickelt, verfeinert und standardisiert. Inzwischen wurde es in seinen klassischen Einsatzgebieten (Telegraphie und Seefunk) fast vollständig abgelöst. Abbildung 15.1 zeigt die wichtigsten Zeichen des Morsealphabets, es gibt hierbei keinen Unterschied zwischen groß und Kleinschreibung. Einzelne Buchstaben werden durch kurze Pausen, Worte durch längere Pausen getrennt:

- eine Strichlänge entspricht drei Punktlängen
- zwei Buchstaben werden durch drei Punktlängen getrennt
- zwei Worte werden durch fünf Punktlängen getrennt

Bei den akustischen Signalen der elektrischen Telegraphen bedeuten zwei schnell aufeinanderfolgende Klicks einen Punkt (gesprochen *Dit*), und zwei langsam aufeinanderfolgende Klicks einen Strich (gesprochen *Dah*).

<b>A</b>	.-	<b>M</b>	--	<b>Y</b>	-.--	<b>6</b>	-....
<b>B</b>	-...	<b>N</b>	-.	<b>Z</b>	---..	<b>7</b>	--...
<b>C</b>	-..	<b>O</b>	---	<b>Ä</b>	..-.	<b>8</b>	---..
<b>D</b>	-..	<b>P</b>	.-.	<b>Ö</b>	---.	<b>9</b>	----.
<b>E</b>	.	<b>Q</b>	--.	<b>Ü</b>	..--	.	.-.-.
<b>F</b>	...	<b>R</b>	..	<b>Ch</b>	----	,	---.-
<b>G</b>	--.	<b>S</b>	...	<b>0</b>	-----	?	..-..
<b>H</b>	....	<b>T</b>	-	<b>1</b>	.----	!	...-
<b>I</b>	..	<b>U</b>	..-	<b>2</b>	..----	:	----...
<b>J</b>	.-.	<b>V</b>	...-	<b>3</b>	...--	“	.-.-.
<b>K</b>	-.-	<b>W</b>	.-	<b>4</b>	....-	‘	.----.
<b>L</b>	.-..	<b>X</b>	-.-	<b>5</b>	.....	=	-...-

Abbildung 15.1: Das Morsealphabet.

### 15.3 Bau des Telegraphen

Unser Telegraph besteht aus zwei Einheiten: dem Sender (Taster) und dem Empfänger (Abb. 15.3). Um ihn zu bauen brauchen wir das in Abb. 15.2 gezeigte Material:

- 2 Holzstücke, 10 cm und 20 cm lang
- 2 Metallstreifen , 10 cm und 20 cm lang, magnetisierbar
- 2 Eisennägeln, 10 cm lang, magnetisierbar
- 5 Holzschrauben aus Metall, 2 cm lang
- mehrere Meter Kabel
- eine 4,5 V Batterie

**Der Taster** Um den Taster zu bauen, schrauben wir den kurzen Metallstreifen auf dem kurzen Holz fest. Am freien Ende des Streifens schrauben ein weitere Schraube ins Holz, unter den Streifen, das ist dann unser Kontakt. Wir verbinden einen Pol der Batterie durch ein Kabel mit einer der Schrauben, die den Metallstreifen festhalten.

**Der Empfänger** Wir schlagen einen Nagel etwa 1 cm tief in die Mitte des langen Holzstückes, daraus wird unser Elektromagnet. Wir wickeln ein dünnes Kabel dicht auf den Nagel auf, etwa 100 Windungen. Dadurch machen wir aus dem Nagel eine Spule. Das eine (kurze) Ende des Kabels wird an die Batterie angeschlossen, das andere (lange) Ende um die Kontakt-Schraube des Tasters gewickelt. Jetzt wird der winkelförmige Metallstreifen an entsprechender Stelle auf dem langen Holz festgeschraubt, das schwebende Ende über der Nagelspule. Ein weiterer Nagel wird neben den



Abbildung 15.2: Das Material um den Telegraphen zu bauen.

ersten ins Holz geschlagen, aber nicht ganz so tief. Der schwebende Metallstreifen befindet sich nun zwischen beiden Nägelköpfen, das erfordert etwas Feintuning.

**Funktionsweise** Unser elektrischer Telegraph funktioniert folgendermaßen: Betätigen wir den Taster, wird der gesamte Stromkreis geschlossen, ein Strom fließt durch die Spule (mit Kabel umwickelter Nagel). Dadurch entsteht in der Spule ein Magnetfeld, dieses zieht den Metallstreifen auf den Nagel, es ertönt ein *klack*. Lassen wir den Taster los, schwingt der Metallstreifen zurück und berührt den anderen Nagel, es ertönt ein weiteres *klack*. Um jetzt im Morsecode einen Morse-Punkt zu erzeugen, betätigt man kurz den Taster, man hört ein *klackklack*. Um einen Morse-Strich zu erzeugen, betätigt man den Taster etwas länger, es ertönt ein *klack klack*. Taster und Empfänger können mehrere Meter auseinander sein, ihr könnt also von Zimmer zu Zimmer morsen.

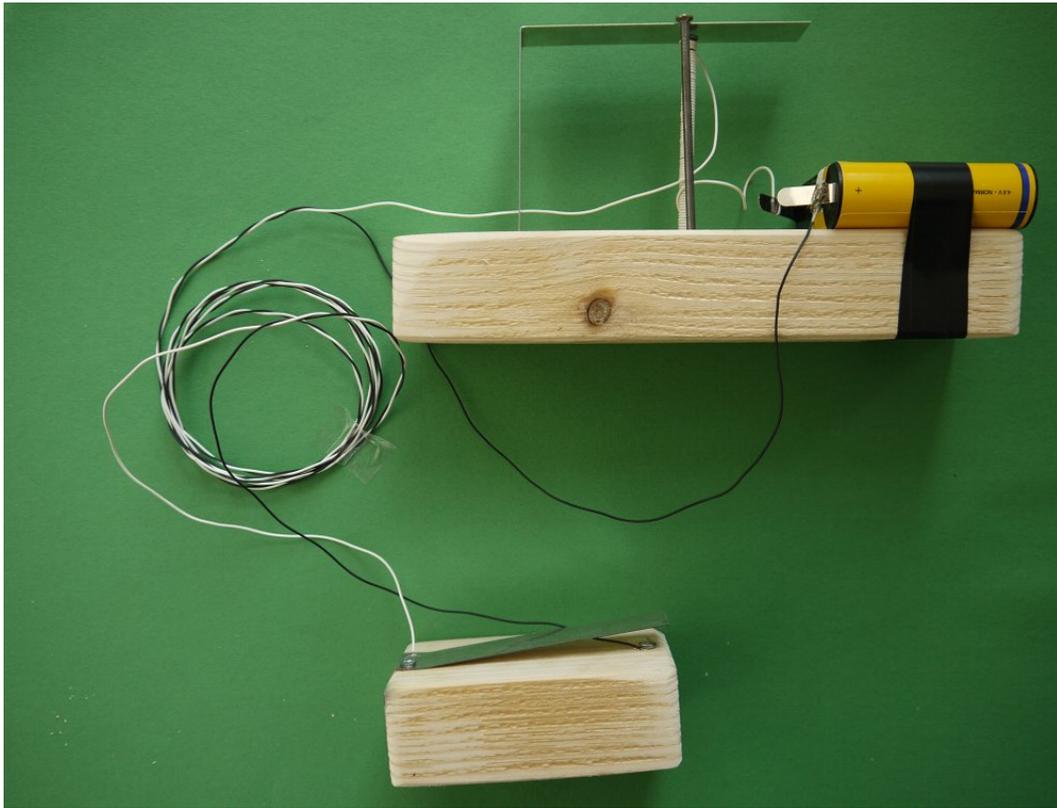


Abbildung 15.3: Der fertige Telegraph, unten der Taster, oben der Empfänger.

# Kapitel 16

## Das Detektorradio

### 16.1 Motivation

Heute kaum mehr vorstellbar, aber es ist möglich, ohne Stromquelle Radio zu hören. Man benutzt hierfür den sogenannten *Detektorempfänger*, der noch aus der Anfangszeit des Radios stammt. Er besteht aus einem Filter und einem Demodulator (siehe Abb. 16.1). Die Energie der elektromagnetischen Wellen, die von der Antenne aufgenommen wird, ist ausreichend um starke Sender zu hören. Die Antenne kann dabei aus einem isoliertem Draht (Kupferlackdraht) von bis zu 50 m oder mehr Länge bestehen. Zum Anhören muss man allerdings einen hochohmigen Kopfhörer ( $k\Omega$ ) benutzen, ein Lautsprecher würde dann doch eine separate Stromquelle erfordern. Eine gute Erdung ist ebenfalls notwendig. Besonders gut geeignet ist das Radio für Sender im Mittelwellenbereich (siehe Abb. 16.9). Bauplan und Anleitung zu diesem Experiment entstanden zusammen mit Thomas Schanz.

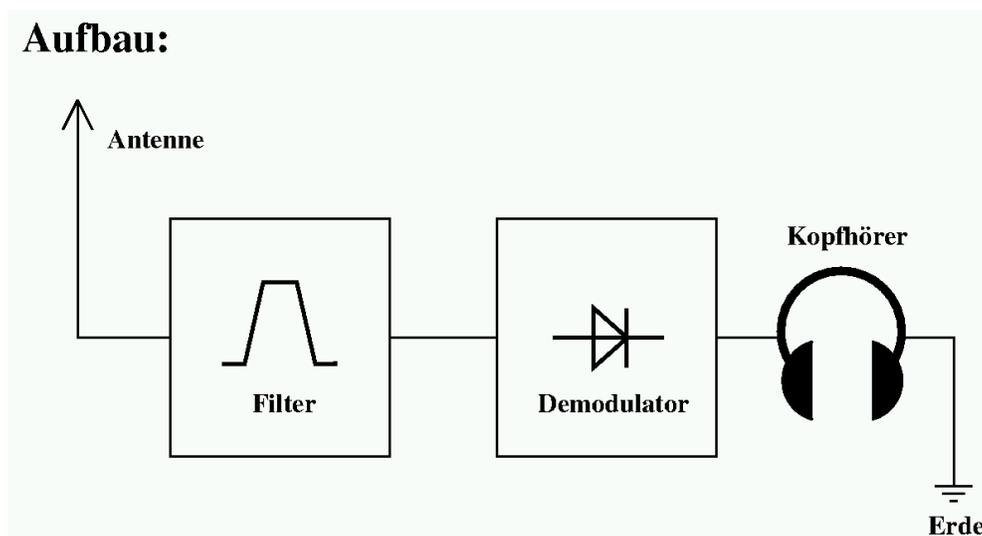


Abbildung 16.1: Schematische Funktionsweise eines Detektorradios (T.Schanz).

## 16.2 Filter

Eine Radiowelle induziert zwischen Antenne und Erde eine Wechselspannung. Zur Auswahl der Empfangsfrequenz dient ein Schwingkreis als Filter (siehe Abb. 16.2). Er besteht aus der Induktivität  $L$  (Spule) und der Kapazität  $C$  (Drehkondensator). Zur Erweiterung des einstellbaren Frequenzbereichs kann der Kondensator außerdem zwischen verschiedenen Werten (80 pF oder 240 pF) umgeschaltet werden. Der Schwingkreis bildet einen frequenzabhängigen Widerstand gegen Erde (Widerstandskurve siehe Abb. 16.2). Nur bei der Resonanzfrequenz  $f_{\text{res}}$  ist der Widerstand groß, alle anderen Frequenzen werden gegen Erde kurzgeschlossen. Über den Drehkondensator kann die Resonanzfrequenz  $f_{\text{res}}$  verstellt werden. Damit verschiebt sich die Durchlasskurve des Filters über das Frequenzband und man kann zwischen verschiedenen Sendern auswählen. Dass meistens trotzdem mehrere Sender zu hören sind liegt daran, dass das Filter zu breit ist und leider immer mehrere Sender im Durchlassbereich liegen.

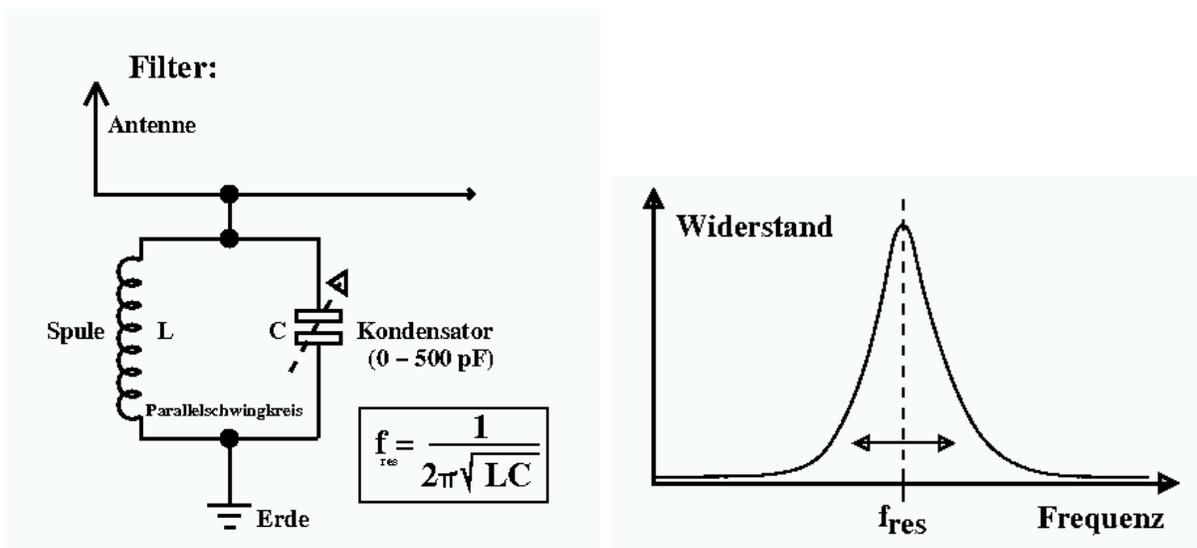


Abbildung 16.2: Schematischer Aufbau des Schwingkreises und Widerstandskurve (T.Schanz).

## 16.3 Demodulator

Das eigentliche Tonsignal besitzt eine viel zu niedrige Frequenz (16 Hz bis 20 KHz) um sie direkt als Radiosignal zu übertragen. Es wird deshalb auf eine hochfrequente Trägerfrequenz durch Amplitudenmodulation oder Frequenzmodulation aufgeprägt (Abb. 16.4). Der Demodulator hat die Aufgabe das niederfrequente Tonsignal der Radiosendung von der hochfrequenten Trägerschwingung des Radiosenders zu trennen. Dazu wird die hochfrequente Trägerschwingung einfach mit einer Diode gleichgerichtet (Abb. 16.3). Übrig bleibt eine Halbwelle, das niederfrequente Tonsignal. Die Mechanik der Lautsprechermembran kann der darunterliegenden Hochfrequenz nicht folgen, sondern gibt nur das ursprüngliche Tonsignal wieder.

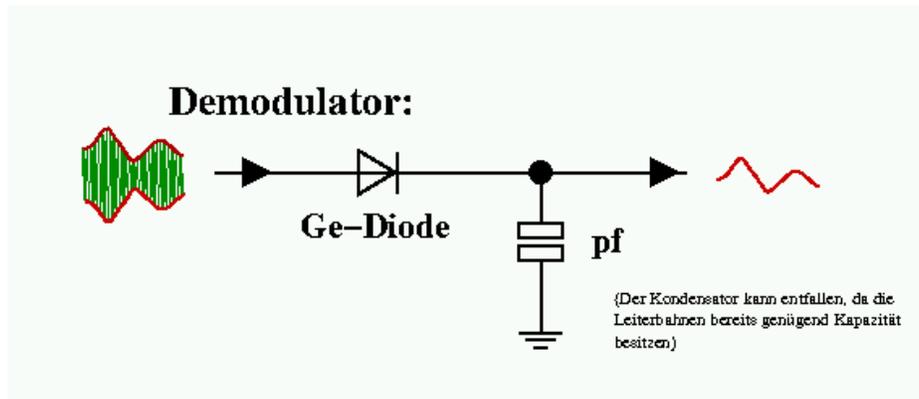


Abbildung 16.3: Schematische Funktionsweise der Diode (T.Schanz).

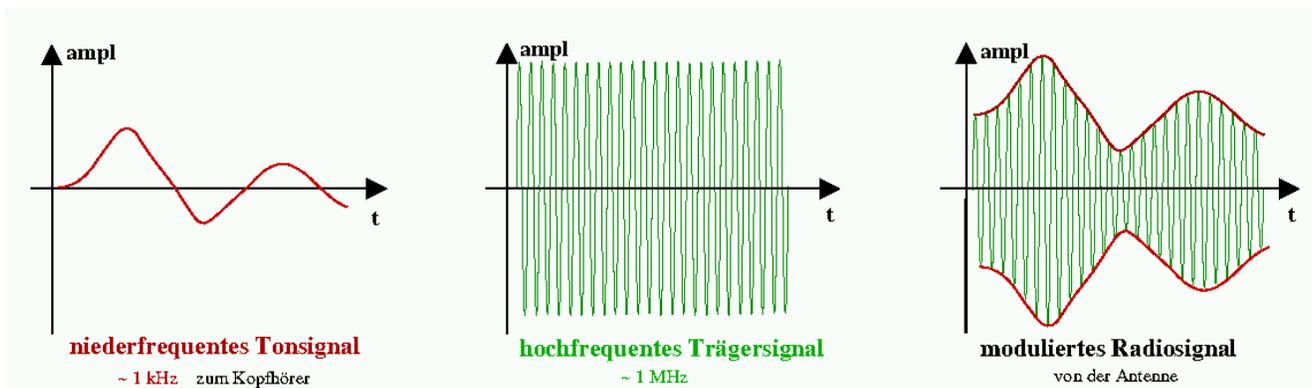


Abbildung 16.4: Prinzip der Amplitudenmodulation (T.Schanz).

## 16.4 Der Zusammenbau

Unser Detektorradio besteht aus folgenden Bauteilen:

- Holztischchen und Kartonrohr
- Kupferlackdraht (0,50 und 0,75 mm)
- diverse Litzen, Lötnägel und Lötösen
- Fotoplatine, Hartpapier, einseitig, 160×100 mm
- Anschlussklemme, 2-polig
- Steckerbuchse, 3,5 mm
- Germaniumdiode, 115 V, 50 mA
- Doppeldrehkondensator, 80 pF und 240 pF

Aufgebaut wird unser Radio auf einem Holztischchen, hier finden sowohl die Platine als auch die Spule Platz (siehe Abb. 16.5 und 16.6). Um eine Spule zu bauen, wickeln wir 100 Windungen des Kupferlackdrahtes um ein Kartonrohr und achten dabei darauf, mehrere Abnehmpunkte einzuplanen. Parallel zur Spule wird der Drehkondensator angeschlossen, er bildet zusammen mit der Spule den Schwingkreis (siehe Abb. 16.7 und Abb. 16.8). Die Frequenz  $f_0$  des Schwingkreises ergibt sich aus der Thomson-Formel:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Hierbei bezeichnet  $C$  die Kapazität unseres Kondensators (80 bzw. 240 pF) und  $L$  die Induktivität der Spule. Mit Hilfe der Windungszahl  $N$ , der Spulenquerschnittsfläche  $A$  und der Spulenlänge  $l$  lässt sich die Induktivität berechnen:

$$L = \mu_0 N^2 \frac{A}{l}$$

$\mu_0$  ist die sog. magnetische Feldkonstante, eine Naturkonstante. Da man den Drehkondensator verstellen kann, kann man den Schwingkreis abstimmen. Schwingt dieser auf einer Frequenz, auf der ein Sender arbeitet, ist also in Resonanz zur Senderfrequenz, wirkt der Schwingkreis wie ein großer Widerstand. Alle anderen Frequenzen werden mit der Erdung kurzgeschlossen, nur die Resonanzfrequenz kommt in Richtung der Kopfhörer durch. Zum Demodulieren des hochfrequenten Signals wird noch eine Germanium-Diode eingelötet. Sie lässt nur eine Halbwelle durch und macht aus der hochfrequenten Wechselspannung eine pulsierende Gleichspannung. Deren Einhüllende ist die gewünschte Niederfrequenz, die vom Kopfhörer verarbeitet werden kann. Je nachdem, in welchem Frequenzbereich man empfangen möchte, verwendet man mehr oder weniger Windungen bei der Spule und verändert damit die Eigenschaften des Schwingkreises und somit die Resonanzfrequenz. Wie in Abb. 16.9 dargestellt, findet man Radiosender für Mittelwelle im Frequenzbereich 300 kHz bis 3000 kHz (1000 m bis 100 m) und für Kurzwelle im Bereich von 3 MHz bis 30 MHz (100 m bis 10 m).

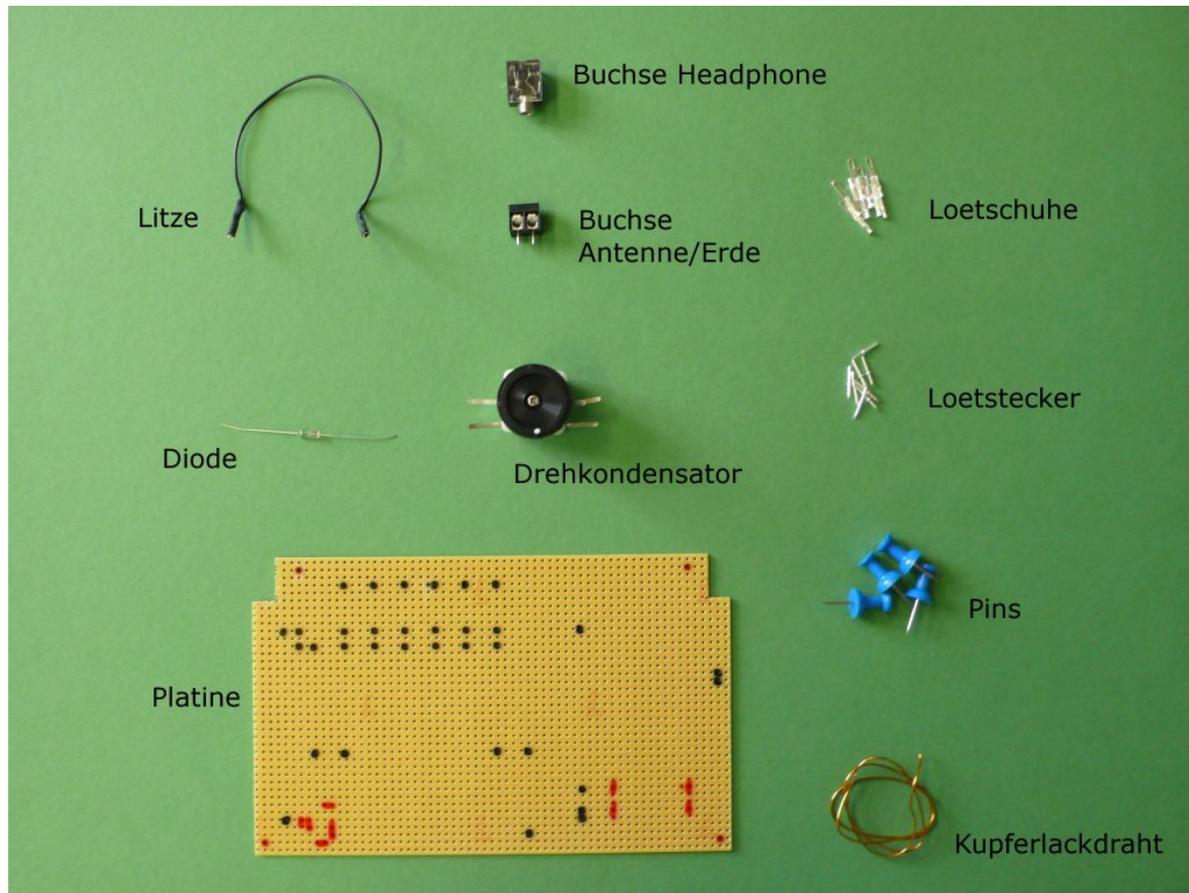


Abbildung 16.5: Einzelteile, die wir brauchen.

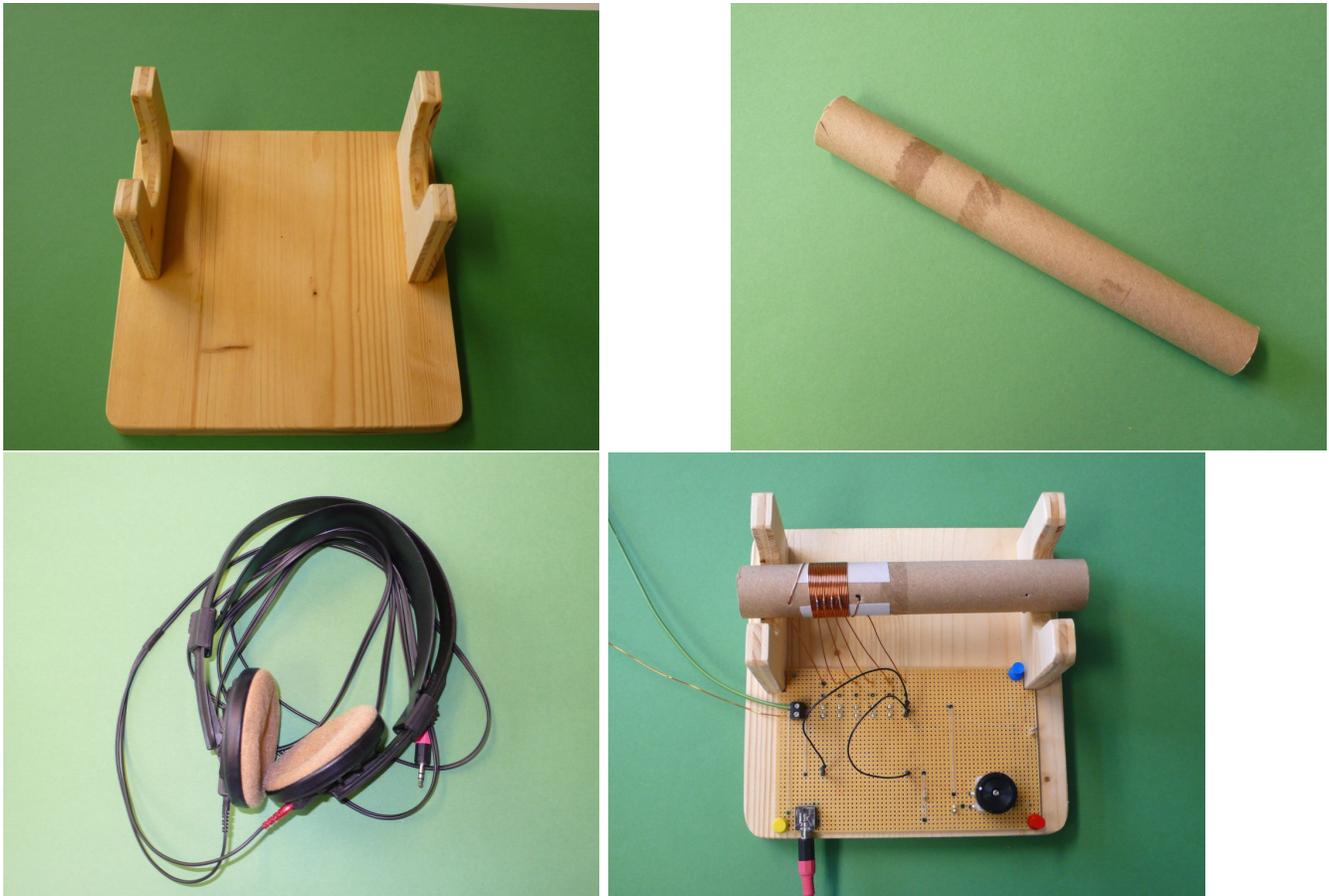
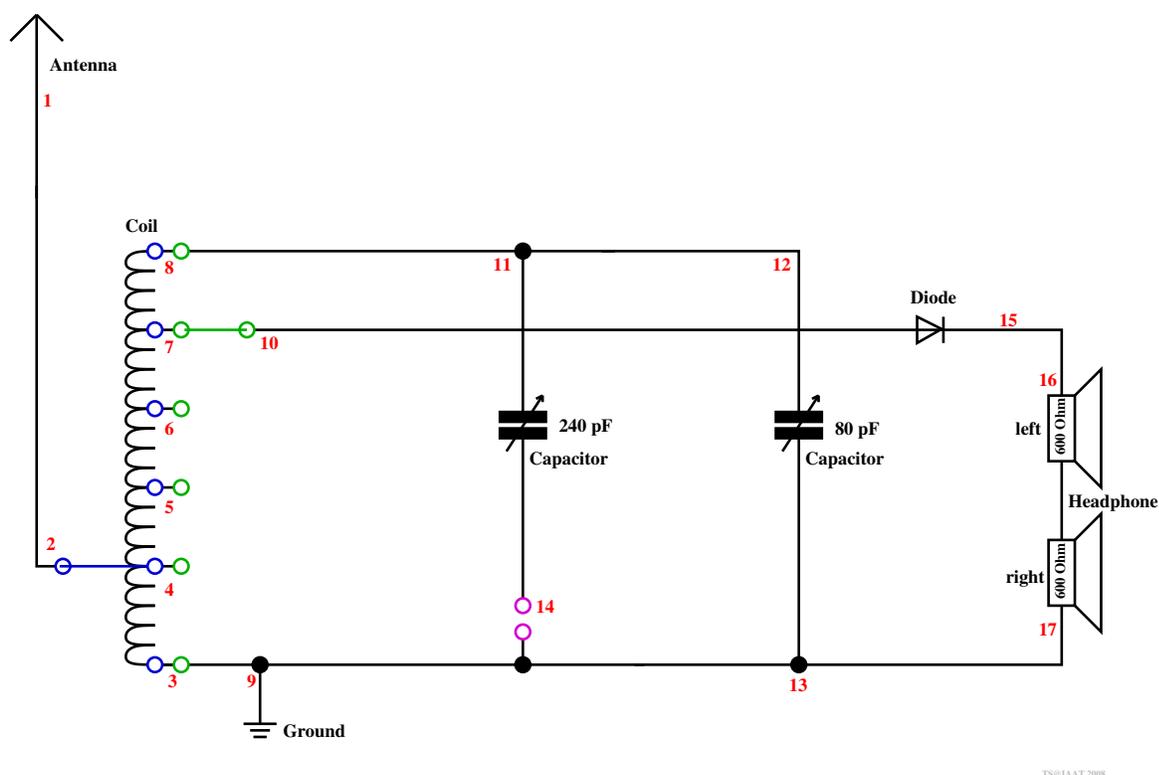


Abbildung 16.6: Grundlage aus Holz, Rolle aus Karton für die Spule, Kopfhörer und das fertige Detektorradio. Links sind hierbei die Anschlüsse für die Antenne (Kupfer) und Erde (grün), unten für den Kopfhörer.

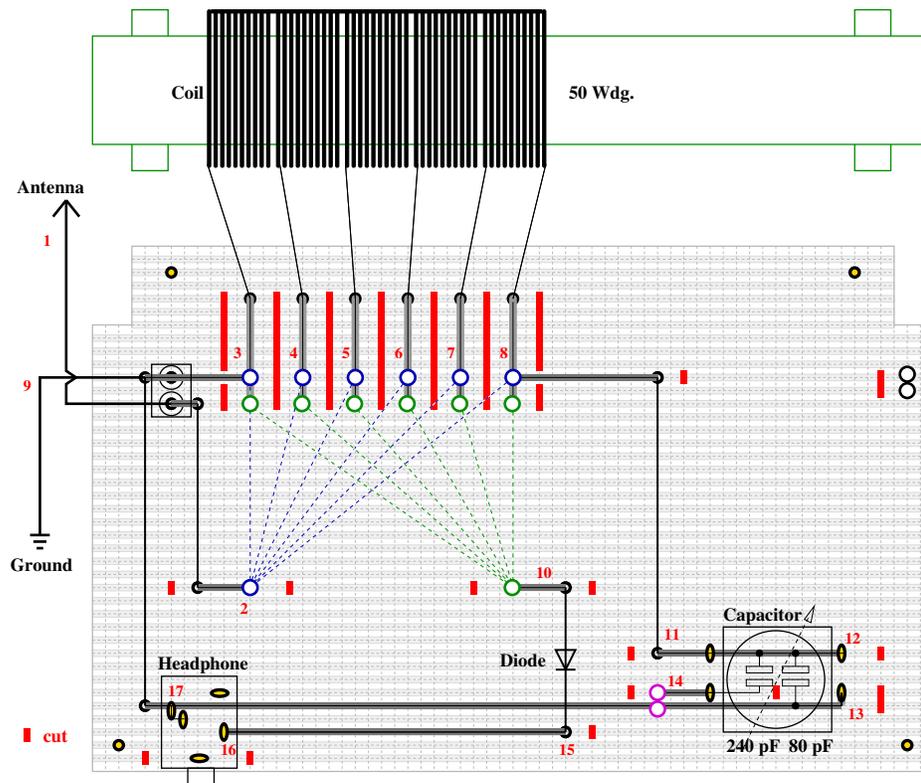
## Detector Radio Schematics:



TS@IAAT 2008

Abbildung 16.7: Schaltplan des Detektorradios (T. Schanz). Die Zahlen finden sich auf dem Bauplan wieder.

## Detector Radio Setup



TS@IAAT 2008

Abbildung 16.8: Bauplan des Detektorradios (T. Schanz).

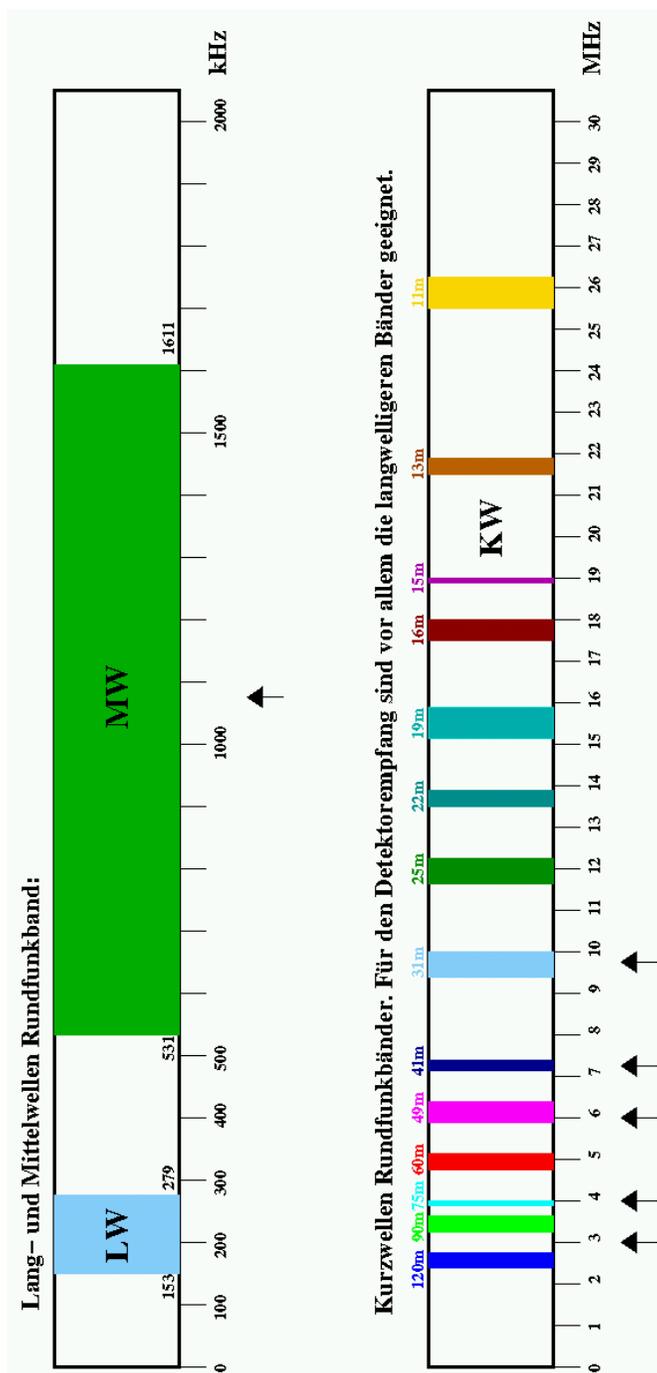


Abbildung 16.9: Übersicht der Senderfrequenzen (T.Schanz).



# Kapitel 17

## Photometrie und Spektroskopie

### 17.1 Sterne und ihre Spektren

Der Weltraum, unendliche Weiten...

Die Sterne, die wir am Himmel sehen, sind extrem weit von uns entfernt. Selbst vom nächsten Stern Proxima Centauri braucht das Licht mehr als 4 Jahre bis zu uns. Deshalb sind keinerlei experimentellen Untersuchungen oder Sondenmissionen möglich (einzige Ausnahme ist die Sonne). Die nahezu einzige Informationsquelle ist das von den Sternen ausgesendete Licht, das aus ihrer Atmosphäre bzw. Photosphäre stammt. Das Sternlicht kann man nun auf zwei unterschiedliche Arten nutzen. Man misst entweder die Gesamthelligkeit über einen großen Wellenlängenbereich, um z.B. Helligkeitsvariationen zu bestimmen. Das nennt sich dann *Photometrie*. Oder man zerlegt das Licht in sein Spektrum, z.B. mit Hilfe eines Prismas. Das ist dann die *Spektroskopie*.

Die Geschichte der Spektroskopie begann am Anfang des 19. Jahrhunderts mit Joseph von Fraunhofer. Er untersuchte das Sonnenspektrum und fand mehr als 500 Linien, die er mit Buchstaben von rot nach blau bezeichnete. Der Ursprung dieser sog. *Spektrallinien* war damals noch unbekannt. Fraunhofer untersuchte auch Spektren anderer Sterne (Sirius, Pollux, Beteigeuze) mit Hilfe eines Objektivprismenspektroskops und erkannte Unterschiede. In den 1860er Jahren wurde von Pater Angelo Secchi eine erste Spektralklassifikation eingeführt, sie stellte sich jedoch schnell als zu grob heraus. In den folgenden Jahrzehnten wurde die auch heute noch aktuelle Harvard-Klassifikation entwickelt, veröffentlicht als Henry-Draper Katalog. Sie umfasst in ihrer endgültigen Form die Spektralklassen O B A F G K M L T (siehe Abb. 17.1). Verantwortlich für diesen Durchbruch sind vor allem Williamina Fleming, Antonia Maury und Annie Cannon sowie weitere Damen aus Edward Pickering's „Harem“.

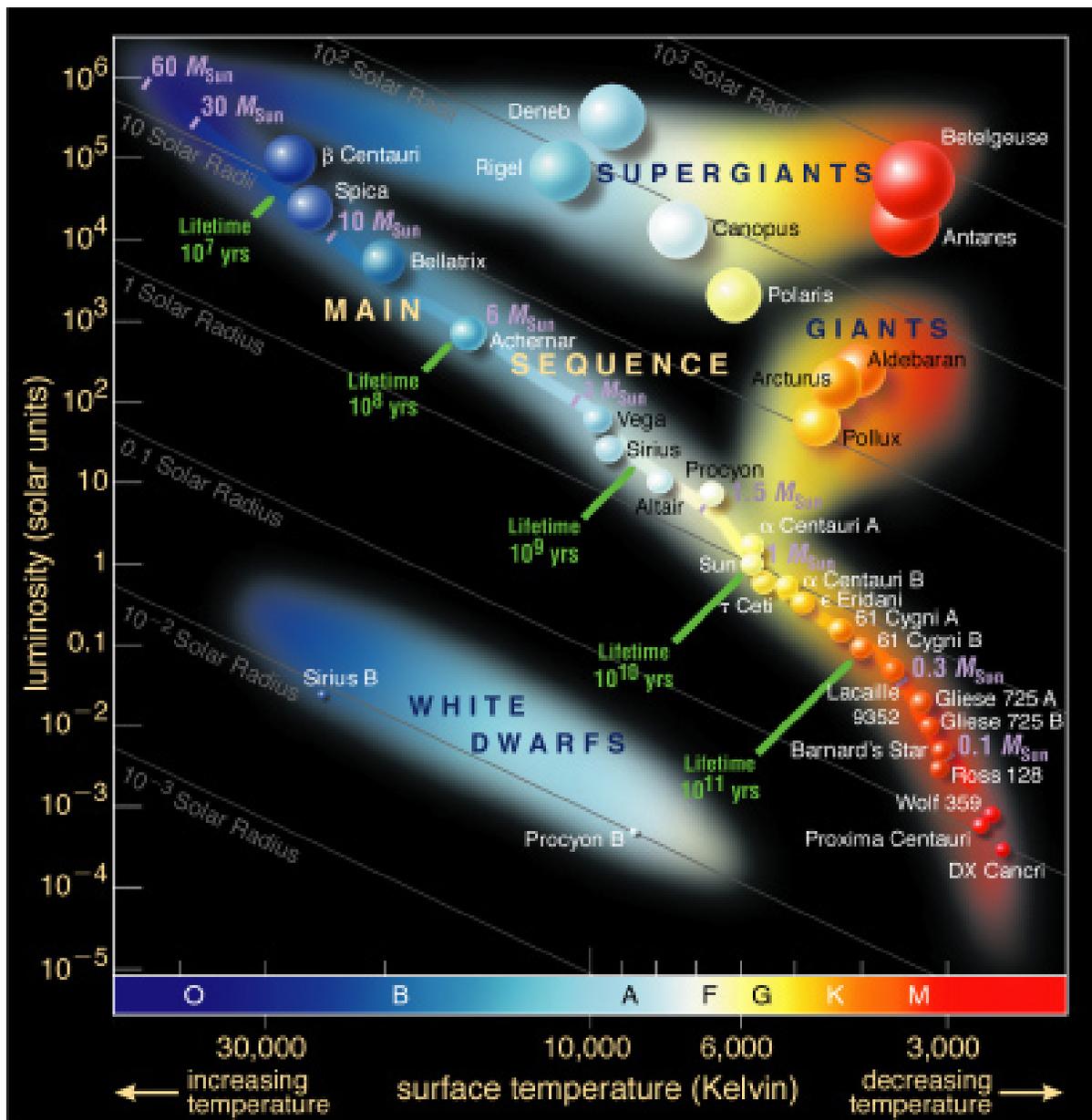


Abbildung 17.1: Hertzsprung-Russell Diagramm mit den Spektralklassen (Quelle: [www4.nau.edu](http://www4.nau.edu))

Das Spektrum eines Sterns (Abb. 17.2) hängt vor allem ab von der Temperatur, Oberflächenbeschleunigung, Dichte und chemischen Zusammensetzung der Sternatmosphäre. Die Analyse des Sternspektrums liefert also detaillierte Erkenntnisse über die Photosphäre des Sterns und erlaubt dadurch Rückschlüsse auf die Sternentwicklung.

Wie muss man sich die Entstehung des Sternspektrums vorstellen ?

- Energieerzeugung (und damit auch Photonen) durch Kernfusion findet im Kern statt
- Licht aus dem Sterninneren (Kontinuumsspektrum) dringt durch die Sternatmosphäre nach außen.
- Je nach Zusammensetzung der Sternatmosphäre wird ein Teil der Photonen absorbiert, im Sternspektrum bilden sich dunkle Linien sog. Absorptionslinien.
- Atome in der Sternatmosphäre können auch zu Emissionen angeregt werden, es entstehen dann Emissionslinien.
- Breite und Tiefe der Spektrallinien hängt u.a. ab vom Druck, Temperatur, chemische Häufigkeiten, Rotationsgeschwindigkeit

Um ein Sternspektrum zu untersuchen, muss es zuerst einmal mit Hilfe eines Teleskops, eines Spektrographen und einer Kamera aufgenommen werden. Dann erfolgt die Wellenlängenkalibration. Ein Modellspektrum wird unter möglichst detaillierter Berücksichtigung der in einer Sternatmosphäre ablaufenden physikalischen Prozesse berechnet und mit dem beobachteten Spektrum verglichen. Das erlaubt die Bestimmung von Parametern wie Temperatur, Druck oder chemische Zusammensetzung, denn die werden für die Berechnung des Spektrums als Randbedingungen vorgegeben und solange verändert, bis optimale Übereinstimmung auftritt.

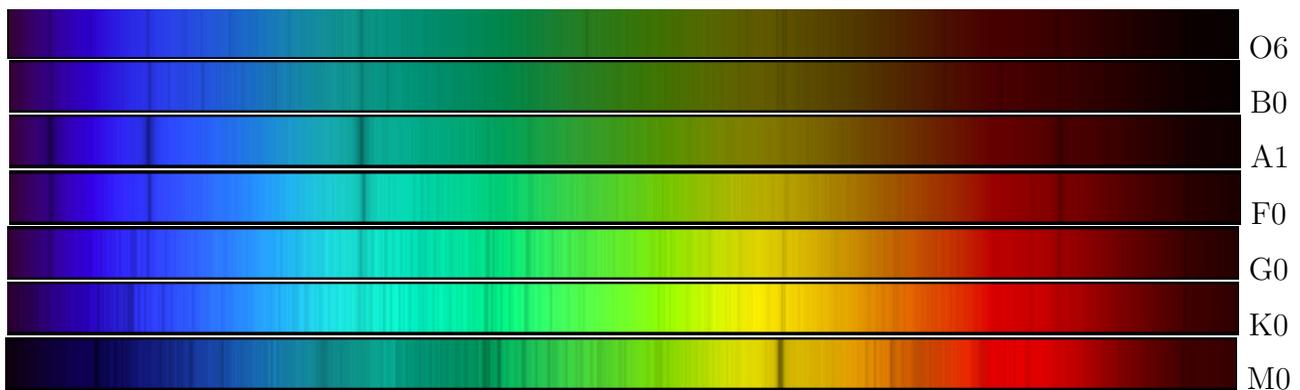


Abbildung 17.2: Sternspektren verschiedener Spektralklassen.

## 17.2 Veränderliche Sterne

Im Laufe ihrer Entwicklung machen Sterne Phasen durch, in denen ihre Helligkeit periodisch, auf unterschiedlichen Zeitskalen und mit zum Teil großen Amplituden variiert (Abb. 17.3). Ein Beispiel hierfür sind die Cepheiden, sie pulsieren radialsymmetrisch auf Zeitskalen von Tagen bis Wochen und verändern dabei ihre Helligkeit um mehrere Magnituden. Ihre Pulsationsperiode steht in direkter Relation zu ihrer absoluten Helligkeit und Leuchtkraft, sie eignen sich deshalb hervorragend zur Entfernungsbestimmung durch den Vergleich ihrer scheinbaren Helligkeit mit der aus der Pulsationsperiode abgeleiteten absoluten.

Ein anderes Beispiel sind pulsierende Weiße Zwerge, also ausgebrannte Sternleichen von der Größe der Erde aber mit der Masse der Sonne. Die Überlagerung verschiedener, angeregter Schwingungen führt auch hier zu einer Helligkeitsvariation, die allerdings nicht mehr mit dem bloßen Auge wahrnehmbar ist. Die Analyse des Schwingungsspektrums Weißer Zwerge (Asteroseismologie) erlaubt Rückschlüsse auf den inneren Aufbau dieser Sterne.

Um die Helligkeitsvariation eines Sterns zu bestimmen, werden über viele Stunden hinweg mehrere hundert Aufnahmen des Sterns gemacht. Diese Aufnahmen werden mit Dunkelstrom und Flatfield korrigiert. Nach der Korrektur des Himmelshintergrundes wird durch Vergleich der Helligkeit des Objektsterns mit Vergleichssterne konstanter Helligkeit eine Lichtkurve gewonnen (Abb. 17.4). Mittels Fourieranalyse wird anschließend nach Perioden in der Lichtkurve gesucht. Diese Schritte führt ihr mit dem Softwarepaket TRIPP (Time Resolved Imaging Photometry Package) durch. Man kann sich natürlich auch sein eigenes Photometriprogramm schreiben, das aus Einzelbildern eine Lichtkurve erstellt. Wie das geht, seht ihr in Kapitel 17.5.

Ein Großteil des heutigen astronomischen Wissens ist in (nahezu) frei zugänglichen Datenbanken gespeichert und abrufbar. Es gibt Datenbanken z.B. für Veröffentlichungen, Objekte, Spektren, Bilder,... Beispiele hierfür sind:

- ADS: [http://adsabs.harvard.edu/abstract\\_service.html](http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html)
- SIMBAD: <http://simbad.u-strasbg.fr/Simbad>
- MAST: <http://archive.stsci.edu/>
- DSS: [http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss\\_form](http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss_form)

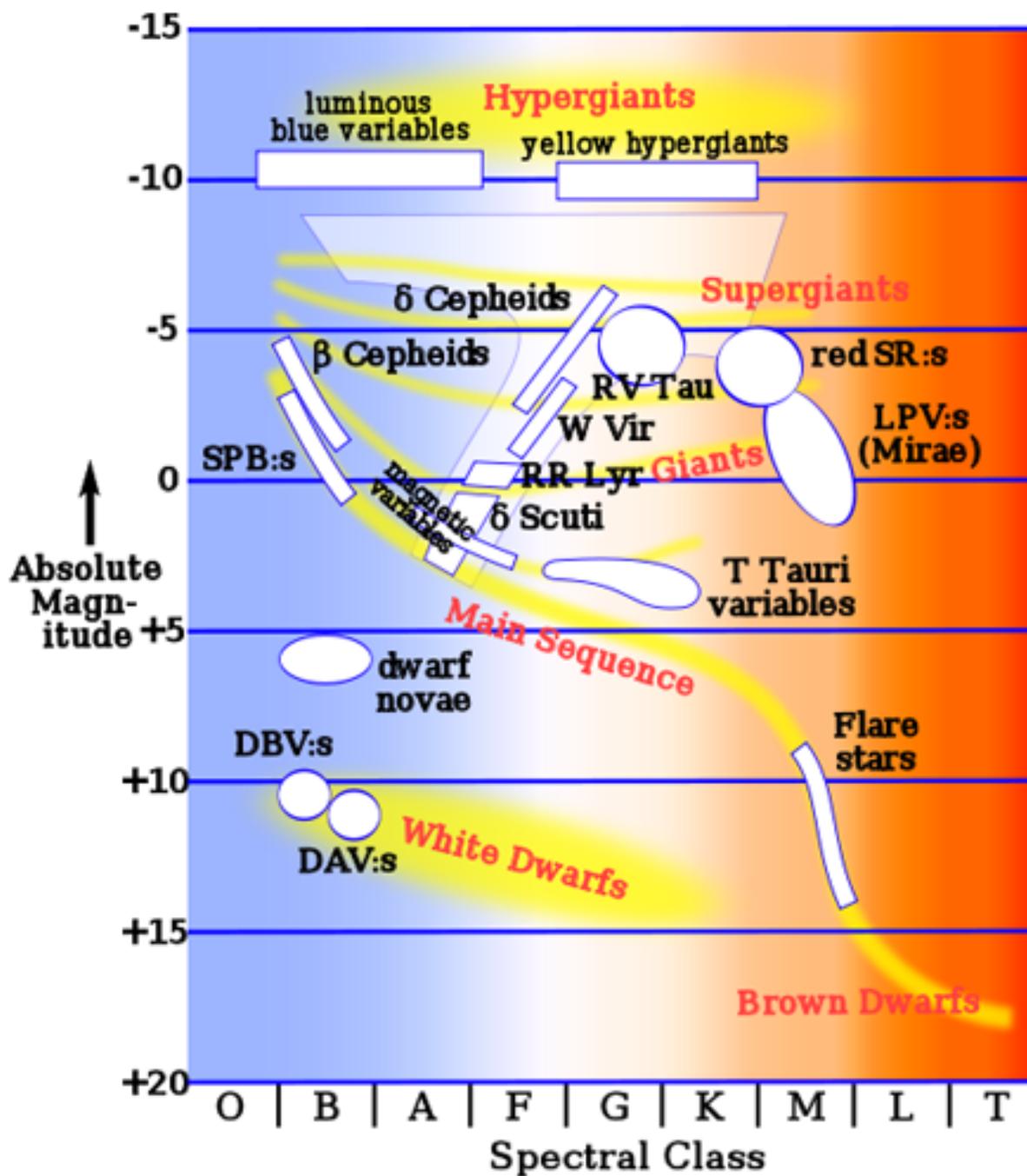
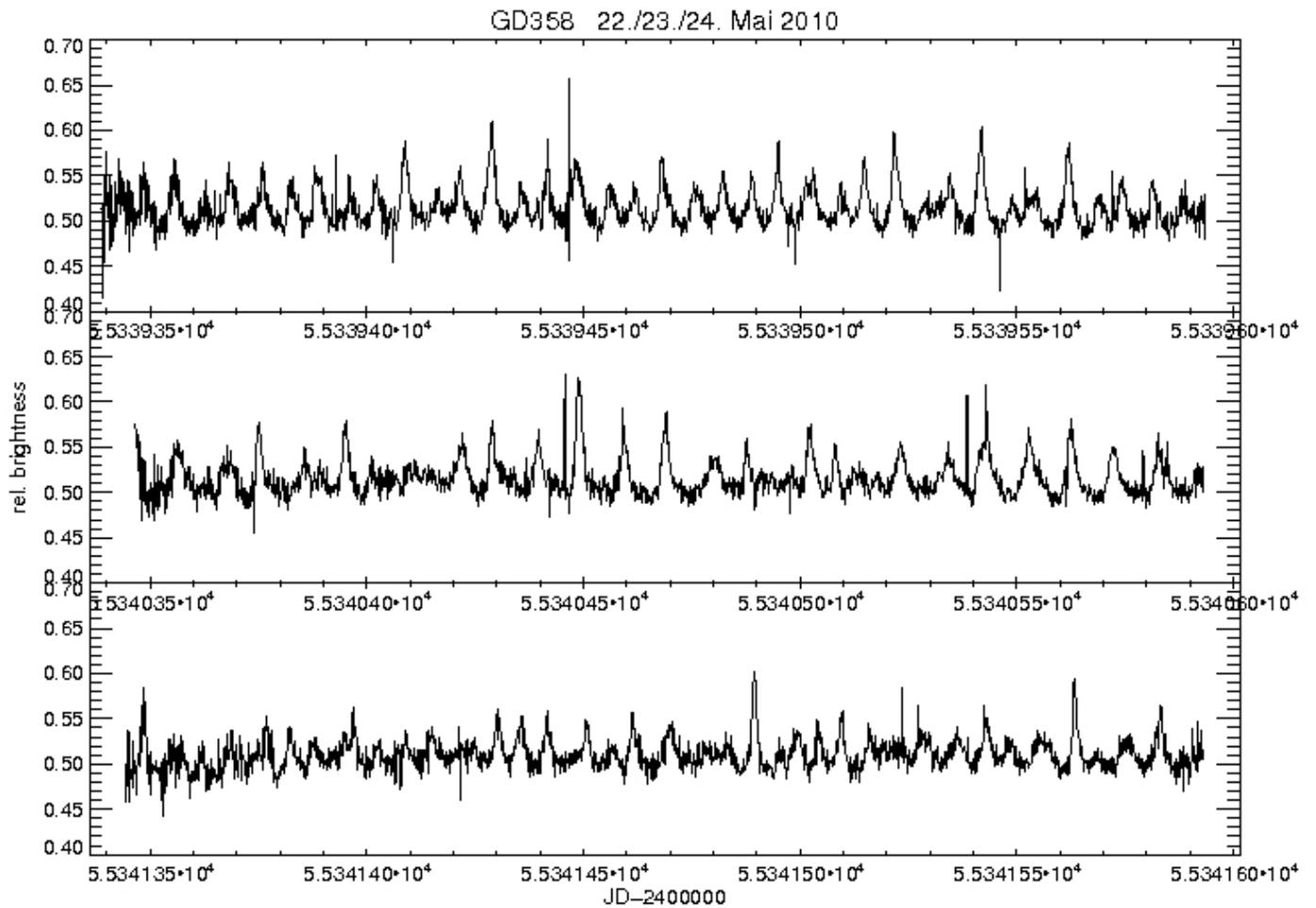


Abbildung 17.3: Variable Sterne im Hertzsprung-Russell-Diagramm (Quelle: wikipedia).



GD358\_L\_G\_MaiLpz 2010/05/1 3:35

Abbildung 17.4: Lichtkurve des pulsierenden Weißen Zwergs GD358.

## 17.3 Instrumentierung

### 17.3.1 Teleskop

Moderne Großteleskope sind heutzutage ausschließlich Spiegelteleskope (Abb. 17.5). Lediglich im Amateurbereich finden sich, je nach Einsatzgebiet, auch Linsenteleskope. Die größten Spiegelteleskope sind das VLT in Chile (8 m, Einzelspiegel), das LBT in USA (8 m, Einzelspiegel) und die Keckteleskope (USA, Kanarische Inseln, 10 m, Spiegelsegmente).

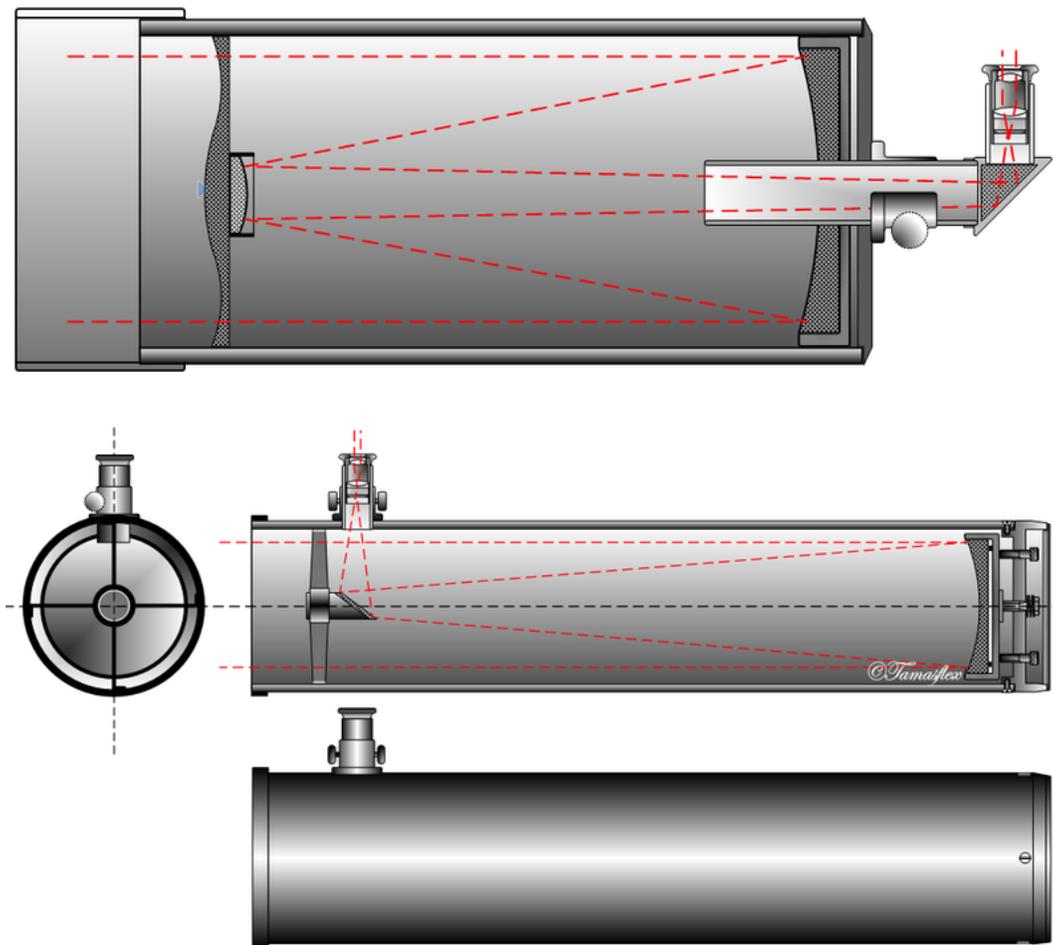


Abbildung 17.5: Darstellung eines Schmidt-Cassegrain-Spiegelteleskops (oben) und eines Newton-Spiegelteleskops (unten) (Quelle: wikipedia).

### 17.3.2 Spektrograph

Moderne Spektrographen nutzen meist Beugung am Gitter, um ein Spektrum zu erzeugen. Man kann aber auch über Brechung am Prisma das Licht zerlegen. Vorteile des Gitterspektrographen (Abb. 17.6) sind ein gleichmäßiges Spektrum und keine Helligkeitsverluste durch Materialdurchquerung. Außerdem kann die Auflösung des Spektrographen, also wie eng Spektrallinien beieinanderliegen dürfen um noch getrennt werden zu können, durch die Anzahl der Gitterstriche beeinflusst werden.

The schematic diagram below shows the key components of a modern slit spectrograph.

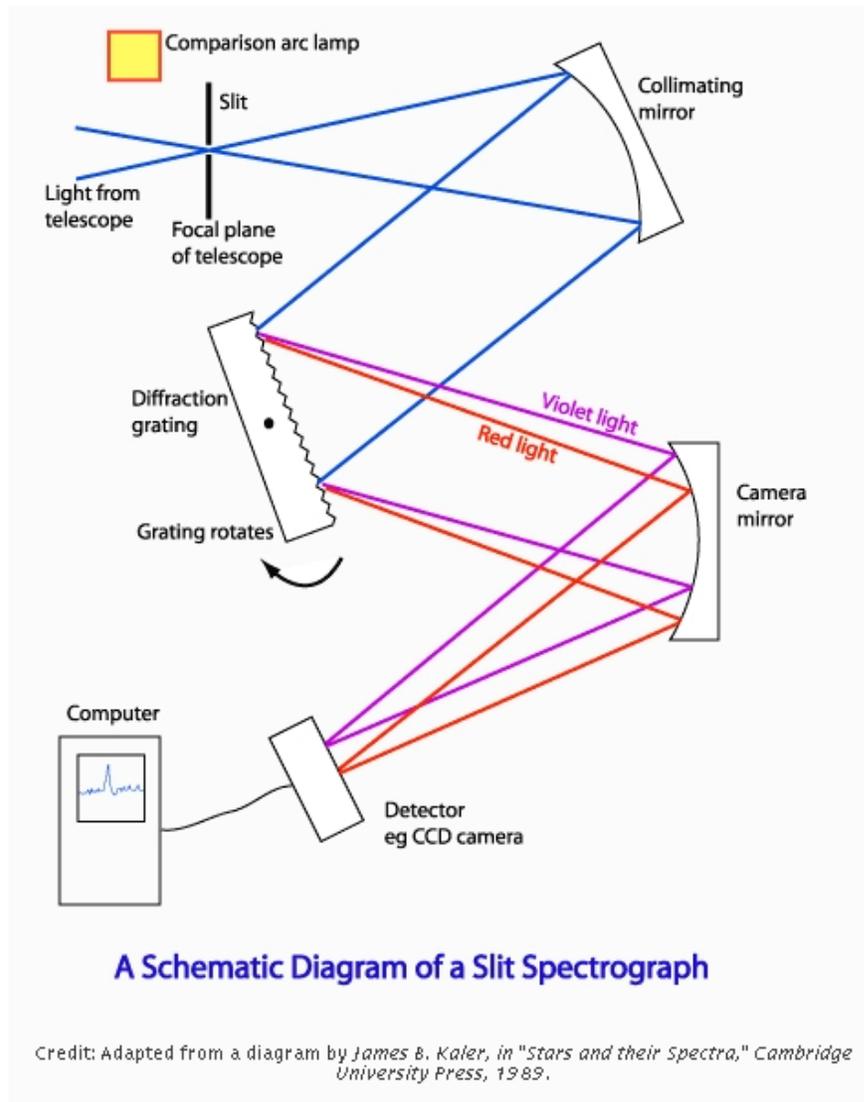


Abbildung 17.6: Schematische Darstellung eines Langspaltspektrographen.

### 17.3.3 CCD Kamera

Der Detektor, der insbesondere in der optischen Astronomie am verbreitetsten ist, ist das CCD (Charge Coupled Device). Das CCD ist ein Halbleiterdetektor, der aus einer zweidimensionalen An-

ordnung von Siliziumdioden besteht. Die einfallenden Photonen erzeugen innerhalb des Festkörpers Elektron-Loch-Paare, wenn ihre Energie ausreicht, um die Elektronen vom Valenz- in das Leitungsband des Halbleiters anzuheben (innerer Photoeffekt), wenn die Photonenenergie also größer als die Bandlücke des Halbleiters ist. Für einen Silizium-Halbleiter beträgt die Bandlücke 1.12 eV. Die freigesetzten Ladungen können an der Grenzschicht zwischen p- und n-dotiertem Silizium durch äußere Spannungen in Potentialmulden gesammelt werden, um somit ein Ladungsbild über längere Belichtungszeiten aufzubauen. Die erzeugte Ladungsmenge ist dem einfallenden Lichtfluss auf das betrachtete Bildelement (Pixel) proportional.

Vorteile eines CCD gegenüber chem. Fotoplatten sind seine hohe Effizienz (bis zu 100%), Linearität, hoher Dynamikumfang (sehr helle und sehr dunkle Objekte können gleichzeitig fotografiert werden), schnelle Auslesezeit, Daten sofort digital verfügbar. Allerdings muss man auch Unannehmlichkeiten in Kauf nehmen. Elektron-Loch-Paare können bereits durch Wärme ausgelöst werden, deshalb muss die Kamera (Abb. 17.7) gekühlt werden, an den großen Observatorien mit flüssigem Stickstoff oder sogar flüssigem Helium. Um das durch Wärme entstehende thermische Rauschen zu korrigieren, wird eine sog. Dunkelstromaufnahme gemacht und vom eigentlichen Bild abgezogen. Um Ungleichheiten der Empfindlichkeit der Pixel sowie Abschattungseffekte durch Staubkörner etc. auszugleichen, wird außerdem eine Flatfieldaufnahme (Aufnahme einer gleichmäßig hellen Fläche) gemacht und alle Bilder durch diese dividiert.



Abbildung 17.7: CCD Kamera STL 1001E von SBIG.

## 17.4 Spektralanalyse

Wir wollen in diesem Experiment Sternspektren kalibrieren, Spektrallinien darin identifizieren und die Sterne ihren Spektralklassen zuordnen. Dieses Experiment beruht auf dem Versuch „Spektroskopie und Photometrie“ des astronomischen Fortgeschrittenenpraktikums im Physikstudium an der Universität Tübingen.. Zur Aufnahme der Sternspektren wurde der 0,8 m-Reflektor des Astronomischen Instituts (der Fakultät für Mathematik und Physik der Universität Tübingen) mit dem anmontierten Spektrographen verwendet. Dieses Teleskop befindet sich in der Beobachtungskuppel auf dem Gelände des Instituts (siehe Anhang).

Die folgenden Auswerteschritte führt ihr an einem LINUX-Rechner am Astronomischen Institut durch. Eure Aufgabe ist es, anhand des Kalibrationspektrums die sichtbaren Kalibrationslinien zu identifizieren und diese in eurem Ausdruck zu markieren. Damit können wir dann die Wellenlängenkalibration durchführen. Anschließend bestimmt ihr die Position der markantesten Spektrallinien und versucht sie zu identifizieren. Die Auswertung der Aufnahmen erfolgt mit der Interpretersprache IDL (Interactive Data Language) der Firma Research Systems, Boulder, CO. IDL kann sowohl in einem interaktiven Modus betrieben werden als auch komplette Programme ausführen. Der große Vorteil von IDL liegt in der einfachen Behandlung von Datenfeldern (Arrays), wodurch es besonders für die Bildverarbeitung prädestiniert ist.

Startet zunächst IDL durch den Befehl `idl`. Das Programm meldet sich mit dem Prompt

```
IDL>
```

Ladet das CCD-Bild des Sternspektrums in ein Array namens `image` und zeigt es in einem Fenster an:

```
IDL> image=readfits('filename.fits',header)
IDL> ccd_tv,image
IDL> shade_surf,image
```

Startet nun die Routine `show_xy`, mit der ihr euch die  $x/y$ -Koordinate der aktuellen Cursorposition im Bildfenster anzeigen lassen könnt. Notiert euch jeweils eine  $y$ -Position für die Eichspektren und für die Ober- und Unterkante des Sternspektrums. Verlasst die Routine `show_xy` durch einen Klick mit der rechten Maustaste in das Bildfenster. Speichert diese Werte in Variablen (hier ein Beispiel mit den Variablen `yeich` und `yspek`):

```
IDL> ccd_tv,image
IDL> show_xy
IDL> yeich1 = 396
IDL> yeich2 = 112
IDL> yspek1 = 230
IDL> yspek2 = 250
```

Kopiert jeweils eine Zeile aus dem Bild, um den Intensitätsverlauf im Eichspektrum und im Sternspektrum in einem Array zu speichern. *Erläuterung:* Ihr greift auf das zweidimensionale Array `image` zu mit dem  $x$ -Index `*` = alle Elemente und dem zuvor gespeicherten  $y$ -Index. Die Arrays `eicharr` und `spekarr` enthalten nun den jeweiligen Intensitätsverlauf:

```

IDL> eicharr1 = image[* ,yeich1]
IDL> eicharr2 = image[* ,yeich2]
IDL> spekarr  = image[* ,yspek1]*1.0
IDL> for k=1,yspek2-yspek1+1 do
    spekarr = spekarr + image[* ,yspek1+k]*1.0
IDL> spekarr = spekarr / (yspek2-yspek1+1)

```

Plottet den Inhalt der Arrays in einem Bildschirmfenster. *Hinweis:* Mit `/ylog` wählt ihr eine logarithmische Darstellung, mit `ystyle=1` weist ihr IDL an, die  $y$ -Grenzen der Grafik auf die tatsächlichen Minimum- und Maximum-Werte zu setzen.

```

IDL> plot,eicharr1,/ylog,ystyle=1
IDL> oplot,eicharr2
IDL> plot,spekarr,ystyle=1

```

Erzeugt nun einen Ausdruck von diesen Plots. Auf den Ausdrucken sollten die Achsen beschriftet sein und der Plot einen Titel haben. Der Ausdruck wird auf Postscript-Druckern erfolgen. Dazu ist der Plot in eine Datei (hier `eichplot.ps`) zu schreiben, welche anschließend auf dem Drucker ausgegeben wird (lange Zeilen geht ihr über den Rand hinaus ein, es erfolgt automatisch ein Umbruch in die nächste Zeile):

```

IDL> open_print,'eichplot.ps',/postscript
IDL> plot,eicharr1,/ylog,ystyle=1,title="Eichspektrum",
    ytitle="Intensitaet",xtitle="Pixelnummer"
IDL> close_print,/ghost

```

Nach dem letzten Befehl erscheint das Programm Ghostview, welches die Datei `eichplot.ps` auf dem Bildschirm darstellt. Über den Menüpunkt "File/Print..." kann die Datei auf dem angegebenen Drucker ausgedruckt werden, eventuell ist der Druckername zuvor zu ändern.

Plottet nun das Eichspektrum noch einmal auf dem Bildschirm (mit den Pfeiltasten lassen sich vorherige Befehle nochmals aufrufen), und ruft die Routine `show_xy` auf, um die  $x$ -Positionen der Spektrallinien der Eichlampen zu bestimmen. Notiert diese auf eurem Ausdruck.

```

IDL> plot,eicharr1,/ylog,ystyle=1,title="Eichspektrum",
    ytitle="Intensitaet",xtitle="Pixelnummer"
IDL> show_xy

```

Bestimmt mit Hilfe einer Cross-Correlation (`c_correlate`) die Verschiebung zwischen den beiden Eichspektren. `indgen(41)-20` erzeugt dabei ein Feld, belegt mit Integerwerten von -20 bis +20. Der  $x$ -Wert des Peaks gibt die Verschiebung an. Falls ihr das Gefühl habt, die Verschiebung ist mehr als nur 20 Pixel, ändert die Grenzen des `indgen(41)-20`-Befehls entsprechend ab.

```

IDL> shift = indgen(41)-20
IDL> fit = c_correlate(eicharr1,eicharr2,shift)
IDL> plot,shift,fit

```

Anschließend versucht ihr, diese Linien durch Vergleich mit dem Eichspektrum (siehe Anhang) zu identifizieren. Beachtet, dass die Linienintensitäten nicht unbedingt im gleichen Verhältnis zu stehen brauchen wie in der Vorlage, wichtig ist das Verhältnis der Linienabstände!

Notiert euch zu jeder identifizierten Linie die Wellenlänge. Tragt eure gemessenen Pixelnummern und die Wellenlängen der identifizierten Linien in jeweils ein Array ein. Addiert die Verschiebung der Eichspektren auf `pixarr` auf. *Beispiel:* Pixelwerte in `pixarr` und Wellenlängenwerte in `wvlarr`:

```
IDL> pixarr=[7,26,76,122,186,231,249,345,371,432,506,542]
IDL> pixarr = pixarr + Verschiebung
IDL> wvlarr=[6143,6164,6217,6266,6334,6383,6402,6506,6532,6599,
           6678,6717]
```

Plottet Pixel gegen Wellenlänge. Wenn eure Identifizierung richtig war, sollte sich eine Gerade ergeben:

```
IDL> plot,pixarr,wvlarr,ystyle=1,psym=2
```

Sollte sich keine Gerade ergeben, so überprüft zunächst, ob ihr in beide Arrays gleich viele Werte eingetragen habt. Ihr könnt die Einträge korrigieren, indem ihr den betreffenden Befehl mit den Pfeiltasten wieder aufruft, und dann editiert. Wenn kein Tippfehler vorliegt, ist vermutlich die Identifizierung falsch. Versucht, eine bessere Identifizierung zu finden und korrigiert eure Werte, bis sich eine Gerade ergibt.

Druckt eure Eichkurve zur Dokumentation wieder aus:

```
IDL> open_print,"eichgerade.ps",/postscript
IDL> plot,pixarr,wvlarr,ystyle=1,title="Eichgerade",
      ytitle="Wellenlaenge [A]",xtitle="Pixelnummer",psym=2
IDL> close_print,/ghost
```

Zur Bestimmung der Geradengleichung führt ihr eine lineare Regression durch. Dies erledigt die IDL-Funktion `poly_fit`. Sie führt eine Polynom-Anpassung an die Wertepaare durch, der Grad des Polynoms ist als Parameter zu übergeben. Für eine Gerade ist der Grad 1. Rückgabewert der Funktion ist ein Array (hier `a`) mit den Polynom-Parametern:

```
IDL> a=poly_fit(pixarr,wvlarr,1)
```

Lasst euch die Parameter anzeigen:

```
IDL> print,a
```

Die erste angezeigte Zahl ist der  $y$ -Achsen-Abschnitt der Eichgeraden, also die Wellenlänge für Pixel 0. Die zweite Zahl ist die Steigung der Geraden, also der Eichfaktor in  $\text{\AA}/\text{Pixel}$ .

Nun ist das Sternspektrum mit einer Wellenlängeneichung zu versehen. Dazu müsst ihr zunächst die Größe des Arrays mit dem Sternspektrum wissen:

```
IDL> help, spekarr
SPEKARR          FLOAT          = Array[765]
```

Die zweite Zeile ist die Ausgabe des `help`-Befehls. In diesem Fall handelt es sich also um ein Array mit 765 Werten.

Erzeugt nun ein Array mit den Pixelwerten von 0 bis 764 (`findgen(765)`) und wendet darauf die Geradengleichung mit den gefundenen Eichparametern an:

```
IDL> lambda=a[0]+a[1]*findgen(765)
```

Das Ergebnis ist ein Array mit den Wellenlängenwerten (hier `lambda`) zu jedem Pixelwert des Sternspektrums.

```
IDL> open_print,"eichgerade.ps",/postscript
IDL> plot,pixarr,wvlarr,ystyle=1,title="Eichgerade",
      ytitle="Wellenlaenge [A]",xtitle="Pixelnummer",psym=2
IDL> oplot,findgen(765),lambda
IDL> close_print,/ghost
```

Plottet euer Sternspektrum mit Wellenlängenskala zunächst auf dem Bildschirm und druckt es anschließend aus. Druckt auch das Eichlampenspektrum mit Wellenlängeneichung aus:

```
IDL> open_print,"sternspektrum.ps",/postscript
IDL> plot,lambda,pekarr,ystyle=1,title="Sternspektrum",
      ytitle="Intensitaet",xtitle="Wellenlaenge [A]"
IDL> close_print,/ghost
IDL> open_print,"eichspektrum.ps",/postscript
IDL> plot,lambda,eicharr1,ystyle=1,/ylog,title="Eichspektrum",
      ytitle="Intensitaet",xtitle="Wellenlaenge [A]"
IDL> close_print,/ghost
```

Ruft wieder die Routine `show_xy` auf und bestimmt die Wellenlängen der Absorptionslinien:

```
IDL> plot,lambda,pekarr,ystyle=1,title="Sternspektrum",
      ytitle="Intensitaet",xtitle="Wellenlaenge [A]"
IDL> show_xy
```

Identifiziert die wichtigsten Linien anhand Anhang C. Sollte `show_xy` keine Koordinaten anzeigen, identifiziert sie von Hand mit Hilfe der Ausdrucke. Vergleicht die gemessene Wellenlänge mit der tabellierten Wellenlänge. Falls dort eine Differenz von mehr als  $1 \text{ \AA}$  auftritt, kann es sein, daß die CCD-Kamera nicht völlig parallel zum Spektrum ausgerichtet war. Ihr werdet dann im CCD-Bild eine Differenz der Pixelpositionen für einzelne Spektrallinien im oberen und unteren Eichspektrum feststellen. Etwa die Hälfte dieser Differenz ergibt sich damit als Abweichung zwischen Eichspektrum und Sternspektrum. Berücksichtigt diesen Offset bei der Identifizierung der übrigen Linien.

## 17.5 Relative Photometrie

Unser Ziel ist die Bestimmung der Helligkeitsschwankung eines Sternes (Lichtkurve). Hierzu fertigen wir viele Aufnahmen des Sternes mit Hilfe eines Teleskopes und einer CCD Kamera an. Aus diesen Aufnahmen bestimmen wir die Helligkeit des Sternes und tragen sie in einem Diagramm in Abhängigkeit der Zeit auf.

Es stellt sich allerdings folgendes Problem: Die beobachtete Helligkeitsschwankung kann durch Störphänomene verursacht werden, die nichts mit dem Stern zu tun haben (Wolken, Auto, Flugzeug...). Wir messen deshalb die Helligkeit des Sternes relativ zu den Helligkeiten sog. Vergleichssterne in der unmittelbaren Umgebung. Eine durchziehende Wolke verdeckt auch die Vergleichssterne (sehr kleines Bildfeld), so dass eine relative Helligkeitsmessung die Störeffekte korrigiert. Ausserdem wird die Helligkeit des Himmels (Streulicht der Stadt, Mondlicht) eliminiert.

### 17.5.1 Tausend Bilder und eine Lichtkurve

Wie gelangt man von tausend Einzelbildern zur Lichtkurve eines Sternes ? Ihr müsst hierfür folgende Schritte, in der Programmiersprache IDL, durchführen:

- Automatisches Einlesen aller Bilder mit Hilfe einer FOR-Schleife.
- Bestimmung der Position des zu untersuchenden Sterns und des Vergleichsterns.
- Einlesen der Helligkeit des Sterns und des Vergleichsterns in ein array (Feld).
- Einlesen der Helligkeit des Himmelhintergrundes in ein array (Feld).
- Hintergrundkorrektur des Sterns und des Vergleichsterns.
- Berechnung der relativen Helligkeit des Sterns.
- Darstellung der Lichtkurve in einem Diagramm mit der Zeit als x-Achse. Hierzu muss aus den Einzelbildern der Aufnahmezeitpunkt bestimmt werden.

Auf den folgenden Seiten werden diese Schritte vorgestellt.

## 17.5.2 Einlesen eines FITS-files

Beispiel fuer einen Filenamen mit Pfadangabe

```
IDL> filename='data/bild0001.fits'
```

Einlesen des Files

```
IDL> bild=long(readfits(filename,zusatzinfo))
```

Was hat man dadurch erreicht?

```
IDL> ccd.tv,bild
```

```
IDL> print,zusatzinfo
```

## 17.5.3 Helligkeitsmessung

Zunächst sollte versucht werden, den Bereich, dessen Gesamthelligkeit berechnet werden soll, darzustellen, um auch eine visuelle Kontrolle zu haben. Heißt das Dummybild (oder natürlich auch ein echtes) zum Beispiel bild, so wissen Sie ja bereits dass

```
IDL> ccd.tv,bild
```

das gesamte Bild darstellt, die Helligkeit farbig codiert.

```
IDL> ccd.tv,bild[x1:x2,y1:y2]
```

stellt einen Ausschnitt des Bildes dar, und durch Ausprobieren lassen sich geeignete Werte für x1,x2,y1 und y2 finden. Die Gesamthelligkeit in Counts (ohne Himmelshintergrundkorrektur) wäre also so etwas wie

```
IDL> gesamt = bild[x1,y1] +bild[x1+1,y1] +bild[x1+2,y1] +...+bild[x2,y1]
+bild[x1,y1+1]+bild[x1+1,y1+1]+bild[x1+2,y1+1]+...+bild[x2,y1+1]
+bild[x1,y1+2]+...
+...
+bild[x1,y2] +bild[x1+1,y2] +bild[x1+2,y1] +...+bild[x2,y2]
```

Diese Tipperei nimmt einem glücklicherweise die Funktion total ab, die genau diese Rechnung durchführt, aber viel einfacher im Aufruf ist:

```
IDL> gesamt=total(bild[x1:x2,y1:y2])
```

Wenn man die Zentralposition des Objektes zu xobj,yobj bestimmt hat, kann man den entsprechenden Ausschnitt natürlich auch anders ansprechen:

```
IDL> abstand=5 ; 5 hier als Beispiel
```

Zur Kontrolle anschauen:

```
IDL> ccd.tv,bild[xobj-abstand:xobj+abstand,yobj-abstand:yobj+abstand]
```

```
IDL> gesamt=total(bild[xobj-abstand:xobj+abstand,yobj-abstand:yobj+abstand])
```

Kontrolle des Gesamtergebnisses  
IDL> print,gesamt

Zur Korrektur auf den Himmelshintergrund muss nun in einem Hintergrundfeld ebenfalls die Gesamthelligkeit in Counts bestimmt werden. Dazu sucht man sich eine geeignete „leere“ Stelle in der Nähe des Stern aus, und skaliert das Ergebnis gegebenenfalls auf die Fläche, in der man die Sternhelligkeit gemessen hat, bevor der Hintergrund vom Sternsignal abgezogen werden kann. Für die Vergleichsterne muss nun ähnlich verfahren werden. Dann kann der Objektfluss gegen den der anderen Sterne verglichen werden. Welche Schleifen werden hier bei der Umsetzung nötig werden, wenn man bedenkt, dass all diese Messungen wiederholt an vielen Bildern durchgeführt werden müssen ?

Die Bearbeitung dieser Aufgaben, Schritt für Schritt, soll zu einer relativen Lichtkurve des Objekts führen. Die Einzelschritte können, ohne dass sie gleich vollständig umgesetzt werden, schon als Kommentare das zu entwickelnde Programm vorstrukturiert werden.

#### 17.5.4 Bestimmung der Lage des Objekts

Darüber lässt sich in der Hilfe unter cursor mehr erfahren. Ein „Luxus“, aber dafür in Ruhe programmierbar, sobald man ein beliebiges Bild zur Verfügung hat. Herauskommen sollte dabei ein xobj,yobj Wertepaar wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben. Eigentlich sollte dazu ein einfaches

```
IDL> cursor,x,y
```

schon reichen, probieren Sie das aber aus und verbessern Sie es gegebenenfalls mit Hilfe der Hilfe! Richtig schön wird es dann, wenn man sich auch noch einzeichnen lässt, wohin man denn nun geklickt hatte ... aber dafür sollten Sie erst dann Eure Zeit verwenden, wenn eine erste Version des Programmes eine Lichtkurve ausspuckt!

### 17.5.5 Bestimmung des Aufnahmezeitpunktes

Man benötigt dazu Informationen aus dem FITS-header, das heißt einen Teil aus der Variable `zusatzinfo` wie sie in Einlesen eines FITS-files definiert wurde.

```
IDL> help,zusatzinfo ; liefert die Art und Größe von zusatzinfo
```

```
IDL> print,zusatzinfo[i] ; i ist dabei durch eine natürliche Zahl kleiner als die Gesamtgröße von  
zusatzinfo zu ersetzen
```

Damit wird ein einzelner Eintrag ausgedruckt. Wir sind auf der Suche nach der Aufnahmezeit. Probieren Sie

```
IDL> print,zusatzinfo[28]
```

Jetzt müssen String-Operationen her (in der Hilfe: `strcmp`, `strjoin`, `strmatch`, `stregex`, `strmid`, `strpos`), um den 28. Eintrag (eine einzelne String-Variable) in `zusatzinfo` in einzelne Zahlen-Variable umzuwandeln, die Sekunden, Minuten, Stunden, Tag, Monat, Jahr enthalten.

Zur Vorbereitung: Es stehen die folgenden Variablen bereits zur Verfügung:

```
sec, min, hour, day, month, year
```

Wie verwandelt man dies in eine einzelne Zahl, die alle wichtigen Informationen beinhaltet? Denken Sie sich einen geeigneten Nullpunkt aus und führen Sie dann die Umrechnung durch. Zur Information: Die Bilder wurden alle im November 2000 aufgenommen; eine einzelne Serie ist nicht länger als ein paar Stunden. Ein hilfreiches Stichwort kann hier auch „Julianisches Datum“ sein. Dafür gibts im Zweifelsfall dann aber auch fertige Routinen.

### 17.5.6 Bestimmung der Pulsationsperiode

Für die Analyse unserer gewonnenen Lichtkurve verwenden wir CAFE (Common Astronomical Fit Environment). Dies ist eine Metasprache, die auf IDL aufbaut. Um die Periode zu bestimmen, müssen die x-Werte in Sekunden vorliegen. Hier ein paar CAFE-Befehle, mehr findet sich in der CAFE-Anleitung.

- Starten Sie in IDL CAFE: *cafe*
- Laden Sie die Datei der Lichtkurve: *data, Dateiname1, dat*
- Nun können Sie die Lichtkurve plotten: *plot, data:0*
- Ändern Sie das Aussehen des Plots z.B. mit *setplot, psym=0*.
- Mit *setplot* können Sie auch die anderen Optionen des normalen plot-Befehls nutzen (*xtitle, xrange, ...*).
- Versuchen Sie es mal mit *wplot...*
- umwandeln in Magnituden: *modify,y=-2.5\*log10(y),\*,\*,0*
- den Suchbereich für Perioden festlegen mit *set,pmin=100* und *set,pmax=10000* und *set,periodout=1*
- nach Perioden suchen mit: *scargle*
- das Periodogramm (wurde nach group 1 geschrieben) plotten: *plot, data:1*
- wir erstellen uns eine Modell-Lichtkurve: *model, const+const\*sin*
- und plotten Lichtkurve und Modell: *plot, data+model*
- wir verbessern das Modell durch einen Fit: *fit*
- man kann versuchen, durch Eliminieren der dominanten Periode weitere Perioden schwächerer Amplitude zu finden: *modify,y=y-model*
- Erzeugen einer Postscript-Datei: *plotout,testdatei.ps[a4]*
- **Aufgabe:** Analyse zweier Lichtkurven des Sternes GD 358
  - die Datensätze liegen in `/home/prakt/StellStruct-VL/Daten`
  - Darstellung der Lichtkurven und Periodogramme
  - Bestimmung der Pulsationsperioden, Vergleich beider Nächte
  - Achtung: die x-Achse muss sinnvoll in Sekunden umgeformt werden, angegeben ist sie in modifiziertem Julianischen Datum

# Kapitel 18

## Licht und Farben – Spektroskopie

### 18.1 Motivation

Licht und Farben gehören zu unserem täglichen Leben, so dass wir meist nicht weiter darüber nachdenken. Falls doch, stellen wir schnell fest, dass einfach klingende Fragen oft gar nicht so einfach zu beantworten sind:

- Wieso ist der Himmel blau ?
- Wo kommt das Abendrot her ?
- Ist ein grünes T-shirt wirklich grün ?
- Wieso sind Adern blau, obwohl das Blut darin rot ist ?
- Ist das Licht einer Leuchtstoffröhre wirklich weiss ?
- Sind nachts wirklich alle Katzen grau ?
- ...

## 18.2 Einfach Fragen – einfache Antworten ?

### 18.2.1 Wieso ist der Himmel blau ?

Licht, also Photonen, von der Sonne wird an den Luftmolekülen der Erdatmosphäre gestreut. Da die Luftmoleküle, z.B. Stickstoff, sehr viel kleiner sind als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts (350-700 nm), gilt hierbei für den Streuquerschnitt  $\sigma$  das Gesetz der Rayleigh-Streuung:

$$\sigma \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

Blaues Licht wird also viel stärker gestreut als rotes, die mittlere Eindringtiefe (von außen in die Erdatmosphäre) beträgt für violettes Licht nur 4 km, für Gelb 20 km und für Rot 65 km. Trifft also weißes Licht von der Sonne auf die Erdatmosphäre, so werden vor allem die „blauen Photonen“ gestreut, und zwar so heftig und chaotisch, dass sie, wenn sie endlich auf dem Erdboden ankommen, aus allen Richtungen zu kommen scheinen: blauer Himmel (siehe Abb. 18.1).

Violett wird entsprechend dem Gesetz der Rayleigh-Streuung noch stärker gestreut als blau, wieso ist der Himmel nicht Lila ?

### 18.2.2 Was passiert, wenn die Sonne sehr tief steht (Abendrot, Abb. 18.2) ?

### 18.2.3 Und wie sieht der Himmel auf dem Mond aus ?

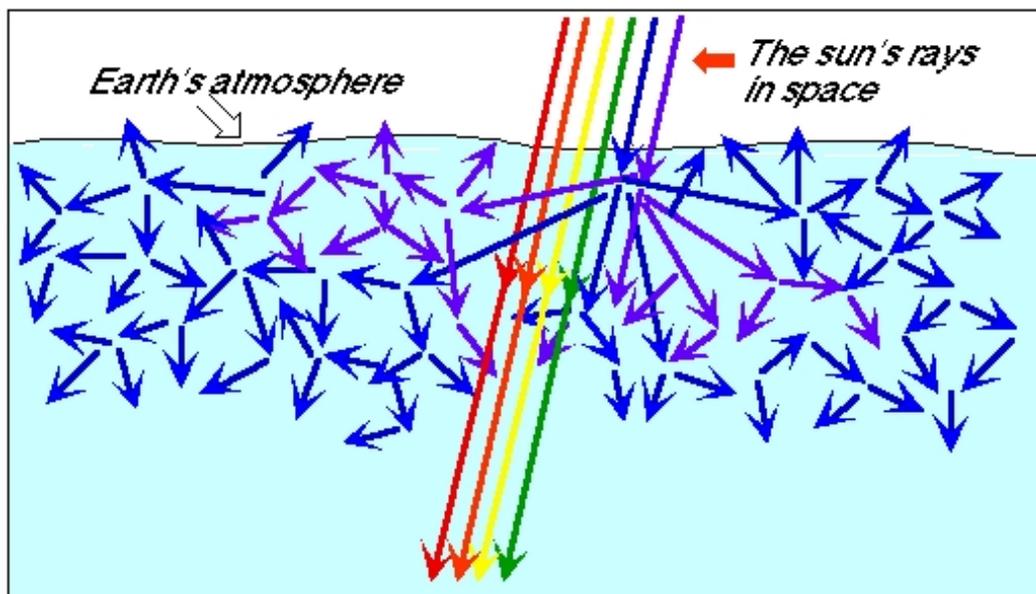


Abbildung 18.1: Die Erdatmosphäre streut den blauen Anteil des Sonnenlichts in alle Richtungen, der Himmel erscheint blau (NOAA).

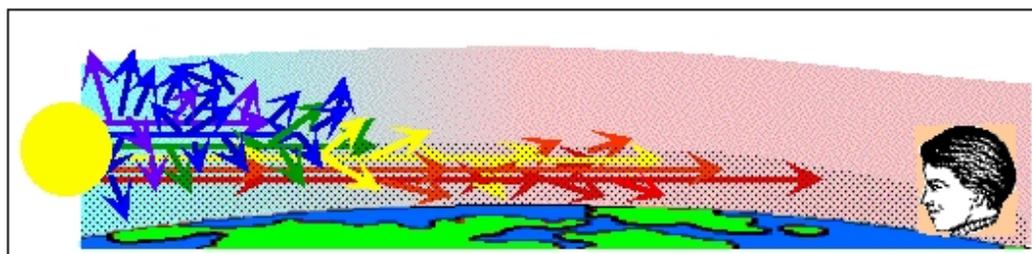


Abbildung 18.2: Bei tiefstehender Sonne (langer Weg durch die Erdatmosphäre) werden alle Farben außer dem roten Anteil des Sonnenlichts weggestreut, die Sonne erscheint rot (NOAA).

## 18.3 Wahrnehmung von Farben

### Additive Farbmischung:

Spezielle Lampen leuchten in ganz spezifischen Farben (Emissionslampen), überlagert man ihr Licht, kann man weißes Licht erzielen (siehe Abb. 18.3 links).

### Subtraktive Farbmischung:

Materialien absorbieren bestimmte Spektralbereiche und erscheinen dann in der Komplementärfarbe (siehe Abb. 18.3 rechts). Dies ist die Art und Weise, wie die meisten Farben in unserer Umgebung entstehen, hängt aber stark von den Eigenschaften der verwendeten Farbstoffe ab. So kann ein Grün entstehen, indem alles außer grün absorbiert wird, oder indem das reflektierte Licht zusammengesetzt grün ergibt. Mit Hilfe eines Spektroskopes kann man herausfinden, welcher Fall zutrifft.

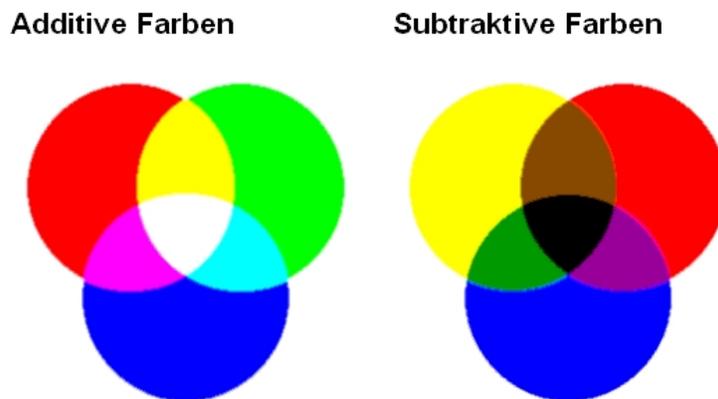


Abbildung 18.3: Beispiel für additive und subtraktive Farben.

## 18.4 Das Spektroskop

Mit Hilfe eines Spektroskopes kann man weißes Licht in seine Spektralfarben zerlegen. Man unterscheidet hierbei

### 1. Prismen-Spektroskop:

Weißes Licht wird beim Durchgang durch ein Prisma gebrochen. Da der Brechungsindex wellenlängenabhängig ist (Dispersion), wird das weiße Licht dabei in seine Spektralfarben zerlegt: blau wird stärker gebrochen als rot.

Nachteile: Dispersion ist nicht linear; Licht muss durch Material durch.

### 2. Gitter-Spektroskop:

Weißes Licht wird beim Durchgang durch ein oder bei der Reflexion an einem Gitter gebeugt. Die Beugung ist wellenlängenabhängig, rot wird stärker gebeugt als blau, ein Spektrum entsteht.

Um verschiedene Lichtquellen untersuchen zu können, bauen wir uns ein kleines Gitter-Spektroskop (siehe Abb. 18.4 und A.3). Wir brauchen hierzu:

- Bastelbogen
- Stück einer CDrom oder DVD
- Schere, Babb (Klebstoff), Lineal
- Kreativität für Verbesserungen, Erweiterungen,...

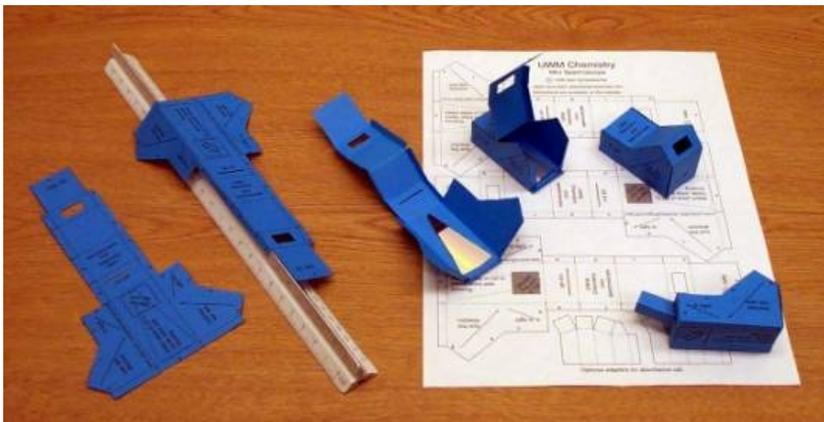


Abbildung 18.4: Selbstbau-Spektroskop nach Alan Schwabacher.

Nachdem wir unser Spektroskop erfolgreich gebaut haben, wollen wir es auch zum Einsatz bringen. Folgende Fragen könnt ihr z.B. untersuchen:

- Wie sieht das Sonnenspektrum aus ?
- Unterscheiden sich die Spektren verschiedener Leuchtstoffröhren ?
- Erkennt man Unterschiede in den Spektren einer billigen Kerze und einer hochwertigen Bienenwachskerze ?
- Verbessert die Verwendung eines DVD-Stückes die Qualität der Spektren ?

Experimentiert mit eurem Spektroskop, untersucht verschiedene Lichtquellen, lasst eurer Phantasie freien Lauf. Jede Gruppe präsentiert ihre Ergebnisse in Form eines kleinen Referats. Das Spektroskop lässt sich auch recht einfach in einen Spektrographen umbauen. Hierzu muss man lediglich am Einguckfenster eine kleine Kamera (Digi, Handy, Webcam) anbringen und mit kurzer Belichtungsdauer fotografieren.

## 18.4.1 Entstehung eines Spektrums durch Beugung am Gitter

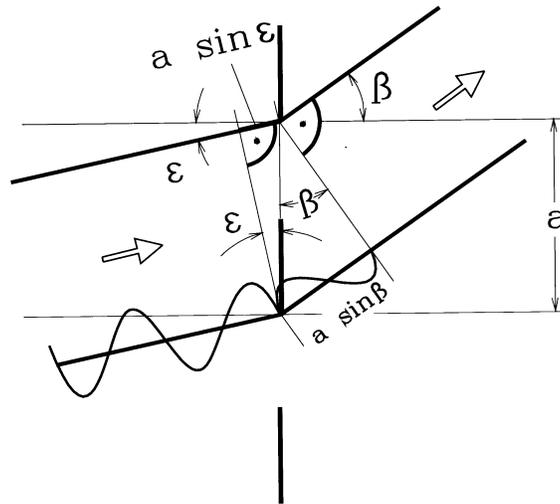


Abbildung 18.5: Geometrie der Beugung am Doppelspalt (Gitter analog): benachbarte Ordnungen liegen um  $\lambda/a = \sin \beta - \sin \epsilon$  auseinander;  $a$  ist der Abstand der parallelen Gitterstriche,  $\epsilon$  der Einfallswinkel und  $\beta$  der Ausfallswinkel

- vereinfachende Annahme: Gitterspalte sind unendlich klein (natürlich haben sie eine gewisse Größe, das macht aber alles nur komplizierter, ohne am Endergebnis („wir haben ein Spektrum“) etwas zu ändern)
- jeder Gitterspalt ist Ausgangspunkt einer Huygens'schen Elementarwelle
- Intensitätsmaxima ergeben sich, wenn der Gangunterschied  $\Delta = a (\sin \beta - \sin \epsilon)$  benachbarter Strahlen einem ganzzahligen Vielfachen  $n$  der Wellenlänge  $\lambda$  entspricht:

$$\sin \beta - \sin \epsilon = \frac{n\lambda}{a}$$

- Lage der Maxima ist abhängig von der Wellenlänge, für langwelliges Licht entsteht das Maximum somit unter größerem Winkel als für kurzwelliges Licht

## 18.5 Sternspektren

### 18.5.1 Spektralklassen

Der Weltraum, unendliche Weiten...

Die Sterne, die wir am Himmel sehen, sind extrem weit von uns entfernt. Selbst vom nächsten Stern Proxima Centauri braucht das Licht mehr als 4 Jahre bis zu uns. Deshalb sind keinerlei experimentellen Untersuchungen oder Sondenmissionen möglich (einzige Ausnahme ist die Sonne). Die nahezu einzige Informationsquelle ist das von den Sternen ausgesendete Licht, das aus ihrer Atmosphäre bzw. Photosphäre stammt. Das Sternlicht kann man nun auf zwei unterschiedliche Arten nutzen. Man misst entweder die Gesamthelligkeit über einen großen Wellenlängenbereich, um z.B. Helligkeitsvariationen zu bestimmen. Das nennt sich dann *Photometrie*. Oder man zerlegt das Licht in sein Spektrum, z.B. mit Hilfe eines Prismas. Das ist dann die *Spektroskopie*.

Die Geschichte der Spektroskopie begann am Anfang des 19. Jahrhunderts mit Joseph von Fraunhofer. Er untersuchte das Sonnenspektrum und fand mehr als 500 Linien, die er mit Buchstaben von rot nach blau bezeichnete. Der Ursprung dieser sog. *Spektrallinien* war damals noch unbekannt. Fraunhofer untersuchte auch Spektren anderer Sterne (Sirius, Pollux, Beteigeuze) mit Hilfe eines Objektivprismenspektroskopes und erkannte Unterschiede. In den 1860er Jahren wurde von Pater Angelo Secchi eine erste Spektralklassifikation eingeführt, sie stellte sich jedoch schnell als zu grob heraus. In den folgenden Jahrzehnten wurde die auch heute noch aktuelle Harvard-Klassifikation entwickelt, veröffentlicht als Henry-Draper Katalog. Sie umfasst in ihrer endgültigen Form die Spektralklassen O B A F G K M L T (siehe Abb. 18.6). Verantwortlich für diesen Durchbruch sind vor allem Williamina Fleming, Antonia Maury und Annie Cannon sowie weitere Damen aus Edward Pickering's „Harem“.

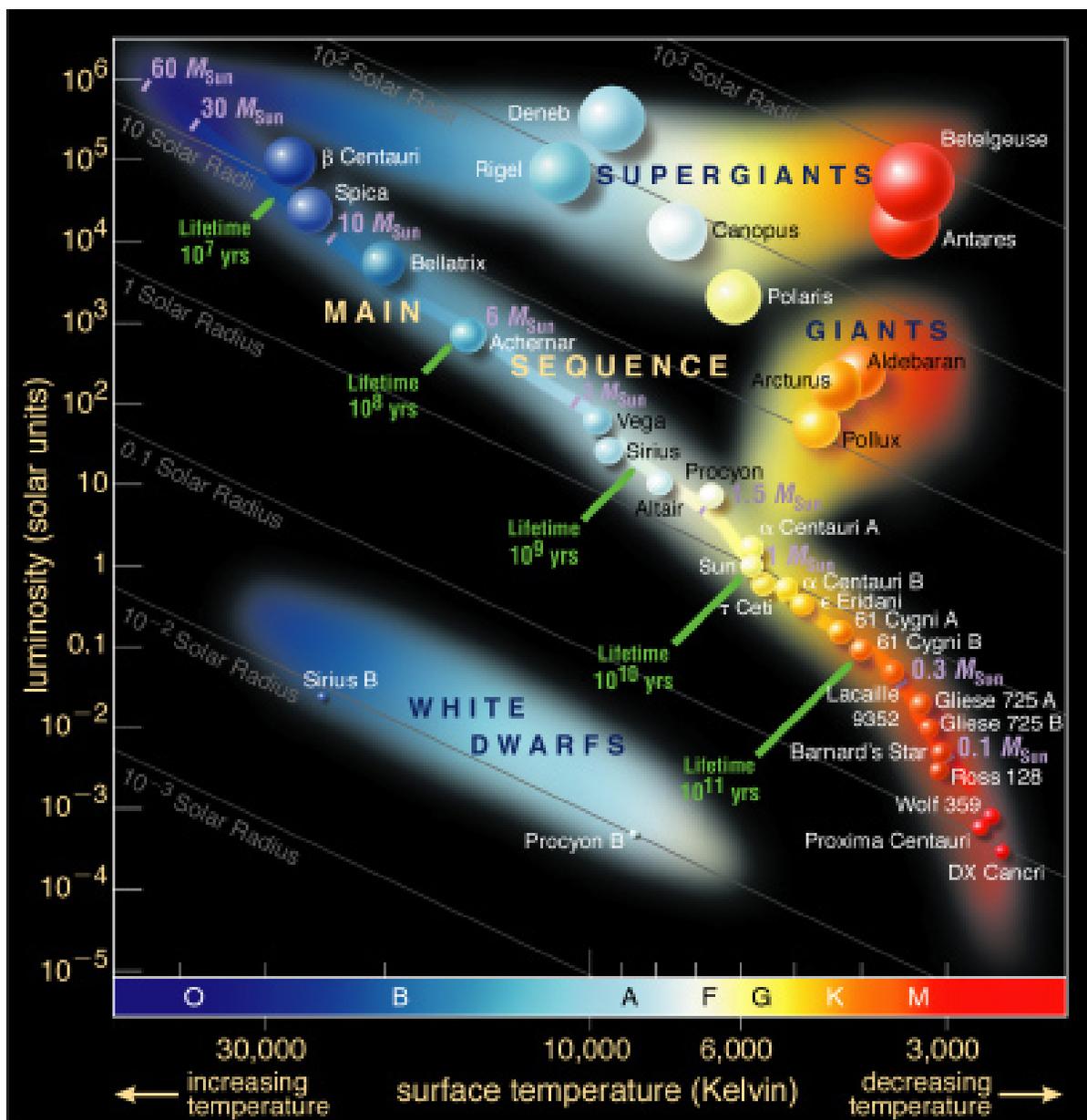


Abbildung 18.6: Hertzsprung-Russel Diagramm mit den Spektralklassen (Quelle: www4.nau.edu)

Das Spektrum eines Sterns hängt vor allem ab von der Temperatur, Oberflächenschwerebeschleunigung, Dichte und chemischen Zusammensetzung der Sternatmosphäre. Die Analyse des Sternspektrums liefert also detaillierte Erkenntnisse über die Photosphäre des Sterns und erlaubt dadurch Rückschlüsse auf die Sternentwicklung.

Wie muss man sich die Entstehung des Sternspektrums vorstellen ?

- Energieerzeugung (und damit auch Photonen) durch Kernfusion findet im Kern statt
- Licht aus dem Sterninneren (Kontinuumsspektrum) dringt durch die Atmosphäre nach außen.
- Je nach Zusammensetzung der Atmosphäre wird ein Teil der Photonen absorbiert.
- Atome in der Atmosphäre können auch zu Emissionen angeregt werden.
- Breite und Tiefe der Spektrallinien hängt u.a. ab vom Druck, chemische Häufigkeiten, Rotationsgeschwindigkeit

Um ein Sternspektrum zu untersuchen, muss es zuerst einmal mit Hilfe eines Teleskops, eines Spektrographen und einer Kamera aufgenommen werden. Dann erfolgt die Wellenlängenkalibration. Ein Modellspektrum wird unter möglichst detaillierter Berücksichtigung der in einer Sternatmosphäre ablaufenden physikalischen Prozesse berechnet und mit dem beobachteten Spektrum verglichen. Das erlaubt die Bestimmung von Parametern wie Temperatur, Druck oder chemische Zusammensetzung, denn die werden für die Berechnung des Spektrums als Randbedingungen vorgegeben und solange verändert, bis optimale Übereinstimmung auftritt.

## 18.5.2 Spektralanalyse

Wir wollen in diesem Experiment Sternspektren am Teleskop aufnehmen, kalibrieren, Spektrallinien darin identifizieren und die Sterne ihren Spektralklassen zuordnen. Dieses Experiment beruht auf dem Versuch „Spektroskopie und Photometrie“ des astronomischen Fortgeschrittenenpraktikums im Physikstudium an der Universität Tübingen.. Zur Aufnahme der Sternspektren wird der 0,8 m-Reflektor des Astronomischen Instituts (der Fakultät für Mathematik und Physik der Universität Tübingen) mit dem anmontierten Spektrographen verwendet. Dieses Teleskop befindet sich in der Beobachtungskuppel auf dem Gelände des Instituts (siehe Anhang). Die Bedienung des Teleskops, der Kamera und des Spektrographen lernt ihr vor Ort kennen.

Die folgenden Auswerteschritte führt ihr an einem LINUX-Rechner am Astronomischen Institut durch. Eure Aufgabe ist es, anhand des Kalibrationsspektrums die sichtbaren Kalibrationslinien zu identifizieren und diese in eurem Ausdruck zu markieren. Damit können wir dann die Wellenlängenkalibration durchführen. Anschließend bestimmt ihr die Position der markantesten Spektrallinien und versucht sie zu identifizieren. Die Auswertung der Aufnahmen erfolgt mit der Interpretersprache IDL (Interactive Data Language) der Firma Research Systems, Boulder, CO. IDL kann sowohl in einem interaktiven Modus betrieben werden als auch komplette Programme ausführen. Der große Vorteil von IDL liegt in der einfachen Behandlung von Datenfeldern (Arrays), wodurch es besonders für die Bildverarbeitung prädestiniert ist.

Startet zunächst IDL durch den Befehl `idl`. Das Programm meldet sich mit dem Prompt

```
IDL>
```

Ladet das CCD-Bild des Sternspektrums in ein Array namens `image` und zeigt es in einem Fenster an:

```
IDL> image=readfits('filename.fits',header)
IDL> ccd_tv,image
IDL> shade_surf,image
```

Startet nun die Routine `show_xy`, mit der ihr euch die  $x/y$ -Koordinate der aktuellen Cursorposition im Bildfenster anzeigen lassen könnt. Notiert euch jeweils eine  $y$ -Position für die Eichspektren und für die Ober- und Unterkante des Sternspektrums. Verlasst die Routine `show_xy` durch einen Klick mit der rechten Maustaste in das Bildfenster. Speichert diese Werte in Variablen (hier ein Beispiel mit den Variablen `yeich` und `yspek`):

```
IDL> ccd_tv,image
IDL> show_xy
IDL> yeich1 = 396
IDL> yeich2 = 112
IDL> yspek1 = 230
IDL> yspek2 = 250
```

Kopiert jeweils eine Zeile aus dem Bild, um den Intensitätsverlauf im Eichspektrum und im Sternspektrum in einem Array zu speichern. *Erläuterung:* Ihr greift auf das zweidimensionale Array `image` zu mit dem  $x$ -Index `*` = *alle Elemente* und dem zuvor gespeicherten  $y$ -Index. Die Arrays `eicharr` und `spekarr` enthalten nun den jeweiligen Intensitätsverlauf:

```
IDL> eicharr1 = image[* , yeich1]
IDL> eicharr2 = image[* , yeich2]
IDL> spekarr = image[* , yspek1]*1.0
IDL> for k=1,yspek2-yspek1+1 do
    spekarr = spekarr + image[* , yspek1+k]*1.0
IDL> spekarr = spekarr / (yspek2-yspek1+1)
```

Plottet den Inhalt der Arrays in einem Bildschirmfenster. *Hinweis:* Mit `/ylog` wählt ihr eine logarithmische Darstellung, mit `ystyle=1` weist ihr IDL an, die  $y$ -Grenzen der Grafik auf die tatsächlichen Minimum- und Maximum-Werte zu setzen.

```
IDL> plot,eicharr1,/ylog,ystyle=1
IDL> oplot,eicharr2
IDL> plot,spekarr,ystyle=1
```

Erzeugt nun einen Ausdruck von diesen Plots. Auf den Ausdrucken sollten die Achsen beschriftet sein und der Plot einen Titel haben. Der Ausdruck wird auf Postscript-Druckern erfolgen. Dazu ist der Plot in eine Datei (hier `eichplot.ps`) zu schreiben, welche anschließend auf dem Drucker ausgegeben wird (lange Zeilen gebt ihr über den Rand hinaus ein, es erfolgt automatisch ein Umbruch in die nächste Zeile):

```
IDL> open_print,'eichplot.ps',/postscript
IDL> plot,eicharr1,/ylog,ystyle=1,title="Eichspektrum",
      ytitle="Intensitaet",xtitle="Pixelnummer"
IDL> close_print,/ghost
```

Nach dem letzten Befehl erscheint das Programm Ghostview, welches die Datei `eichplot.ps` auf dem Bildschirm darstellt. Über den Menüpunkt "File/Print..." kann die Datei auf dem angegebenen Drucker ausgedruckt werden, eventuell ist der Druckername zuvor zu ändern.

Plottet nun das Eichspektrum noch einmal auf dem Bildschirm (mit den Pfeiltasten lassen sich vorherige Befehle nochmals aufrufen), und ruft die Routine `show_xy` auf, um die  $x$ -Positionen der Spektrallinien der Eichlampen zu bestimmen. Notiert diese auf eurem Ausdruck.

```
IDL> plot,eicharr1,/ylog,ystyle=1,title="Eichspektrum",
      ytitle="Intensitaet",xtitle="Pixelnummer"
IDL> show_xy
```

Bestimmt mit Hilfe einer Cross-Correlation (`c_correlate`) die Verschiebung zwischen den beiden Eichspektren. `indgen(41)-20` erzeugt dabei ein Feld, belegt mit Integerwerten von -20 bis +20. Der  $x$ -Wert des Peaks gibt die Verschiebung an. Falls ihr das Gefühl habt, die Verschiebung ist mehr als nur 20 Pixel, ändert die Grenzen des `indgen(41)-20`-Befehls entsprechend ab.

```
IDL> shift = indgen(41)-20
IDL> fit = c_correlate(eicharr1,eicharr2,shift)
IDL> plot,shift,fit
```

Anschließend versucht ihr, diese Linien durch Vergleich mit dem Eichspektrum (siehe Anhang) zu identifizieren. Beachtet, dass die Linienintensitäten nicht unbedingt im gleichen Verhältnis zu stehen brauchen wie in der Vorlage, wichtig ist das Verhältnis der Linienabstände!

Notiert euch zu jeder identifizierten Linie die Wellenlänge. Tragt eure gemessenen Pixelnummern und die Wellenlängen der identifizierten Linien in jeweils ein Array ein. Addiert die Verschiebung der Eichspektren auf `pixarr` auf. *Beispiel:* Pixelwerte in `pixarr` und Wellenlängenwerte in `wvlarr`:

```
IDL> pixarr=[7,26,76,122,186,231,249,345,371,432,506,542]
IDL> pixarr = pixarr + Verschiebung
IDL> wvlarr=[6143,6164,6217,6266,6334,6383,6402,6506,6532,6599,
           6678,6717]
```

Plottet Pixel gegen Wellenlänge. Wenn eure Identifizierung richtig war, sollte sich eine Gerade ergeben:

```
IDL> plot,pixarr,wvlarr,ystyle=1,psym=2
```

Sollte sich keine Gerade ergeben, so überprüft zunächst, ob ihr in beide Arrays gleich viele Werte eingetragen habt. Ihr könnt die Einträge korrigieren, indem ihr den betreffenden Befehl mit den Pfeiltasten wieder aufruft, und dann editiert. Wenn kein Tippfehler vorliegt, ist vermutlich die

Identifizierung falsch. Versucht, eine bessere Identifizierung zu finden und korrigiert eure Werte, bis sich eine Gerade ergibt.

Druckt eure Eichkurve zur Dokumentation wieder aus:

```
IDL> open_print,"eichgerade.ps",/postscript
IDL> plot,pixarr,wvlarr,ystyle=1,title="Eichgerade",
      ytitle="Wellenlaenge [A]",xtitle="Pixelnummer",psym=2
IDL> close_print,/ghost
```

Zur Bestimmung der Geradengleichung führt ihr eine lineare Regression durch. Dies erledigt die IDL-Funktion `poly_fit`. Sie führt eine Polynom-Anpassung an die Wertepaare durch, der Grad des Polynoms ist als Parameter zu übergeben. Für eine Gerade ist der Grad 1. Rückgabewert der Funktion ist ein Array (hier `a`) mit den Polynom-Parametern:

```
IDL> a=poly_fit(pixarr,wvlarr,1)
```

Lasst euch die Parameter anzeigen:

```
IDL> print,a
```

Die erste angezeigte Zahl ist der  $y$ -Achsen-Abschnitt der Eichgeraden, also die Wellenlänge für Pixel 0. Die zweite Zahl ist die Steigung der Geraden, also der Eichfaktor in  $\text{\AA}/\text{Pixel}$ .

Nun ist das Sternspektrum mit einer Wellenlängeneichung zu versehen. Dazu müsst ihr zunächst die Größe des Arrays mit dem Sternspektrum wissen:

```
IDL> help,spekarr
SPEKARR          FLOAT          = Array[765]
```

Die zweite Zeile ist die Ausgabe des `help`-Befehls. In diesem Fall handelt es sich also um ein Array mit 765 Werten.

Erzeugt nun ein Array mit den Pixelwerten von 0 bis 764 (`findgen(765)`) und wendet darauf die Geradengleichung mit den gefundenen Eichparametern an:

```
IDL> lambda=a[0]+a[1]*findgen(765)
```

Das Ergebnis ist ein Array mit den Wellenlängewerten (hier `lambda`) zu jedem Pixelwert des Sternspektrums.

```
IDL> open_print,"eichgerade.ps",/postscript
IDL> plot,pixarr,wvlarr,ystyle=1,title="Eichgerade",
      ytitle="Wellenlaenge [A]",xtitle="Pixelnummer",psym=2
IDL> oplot,findgen(765),lambda
IDL> close_print,/ghost
```

Plottet euer Sternspektrum mit Wellenlängenskala zunächst auf dem Bildschirm und druckt es anschließend aus. Druckt auch das Eichlampenspektrum mit Wellenlängeneichung aus:

```
IDL> open_print,"sternspektrum.ps",/postscript
IDL> plot,lambda,pekarr,ystyle=1,title="Sternspektrum",
      ytitle="Intensitaet",xtitle="Wellenlaenge [A] "
IDL> close_print,/ghost
IDL> open_print,"eichspektrum.ps",/postscript
IDL> plot,lambda,eicharr1,ystyle=1,/ylog,title="Eichspektrum",
      ytitle="Intensitaet",xtitle="Wellenlaenge [A] "
IDL> close_print,/ghost
```

Ruft wieder die Routine `show_xy` auf und bestimmt die Wellenlängen der Absorptionslinien:

```
IDL> plot,lambda,pekarr,ystyle=1,title="Sternspektrum",
      ytitle="Intensitaet",xtitle="Wellenlaenge [A] "
IDL> show_xy
```

Identifiziert die wichtigsten Linien anhand Anhang C. Sollte `show_xy` keine Koordinaten anzeigen, identifiziert sie von Hand mit Hilfe der Ausdrücke. Vergleicht die gemessene Wellenlänge mit der tabellierten Wellenlänge. Falls dort eine Differenz von mehr als  $1 \text{ \AA}$  auftritt, kann es sein, daß die CCD-Kamera nicht völlig parallel zum Spektrum ausgerichtet war. Ihr werdet dann im CCD-Bild eine Differenz der Pixelpositionen für einzelne Spektrallinien im oberen und unteren Eichspektrum feststellen. Etwa die Hälfte dieser Differenz ergibt sich damit als Abweichung zwischen Eichspektrum und Sternspektrum. Berücksichtigt diesen Offset bei der Identifizierung der übrigen Linien.

# Anhang A

## Spektroskopie

### A.1 Wellenlängenkalibration

Tabelle A.1: Laborwellenlängen der Hg- und Ne-Kalibrationslampen nach Kurucz (<http://cfa-www.harvard.edu/amdata/ampdata/kurucz23/sekur.html>).

Ion	$\lambda$ [Å]	Ion	$\lambda$ [Å]	Ion	$\lambda$ [Å]
Hg I	4046.559	Hg I	5790.660	Ne I	6266.495
Hg I	4077.827	Ne I	5852.488	Ne I	6304.789
Ne I	4314.252	Ne I	5881.895	Ne I	6334.428
Hg I	4358.323	Ne I	5944.834	Ne I	6382.991
Hg I	4916.062	Ne I	5975.534	Ne I	6402.246
Ne I	5116.503	Ne I	6029.997	Ne I	6506.528
Ne I	5330.777	Ne I	6074.338	Ne I	6532.882
Ne I	5341.094	Ne I	6096.163	Ne I	6598.953
Ne I	5400.562	Ne I	6143.062	Ne I	6678.331
Hg I	5460.731	Ne I	6163.594	Ne I	6717.043
Hg I	5769.593	Ne I	6217.281		

## A.2 HgNe-Kalibrationsspektrum

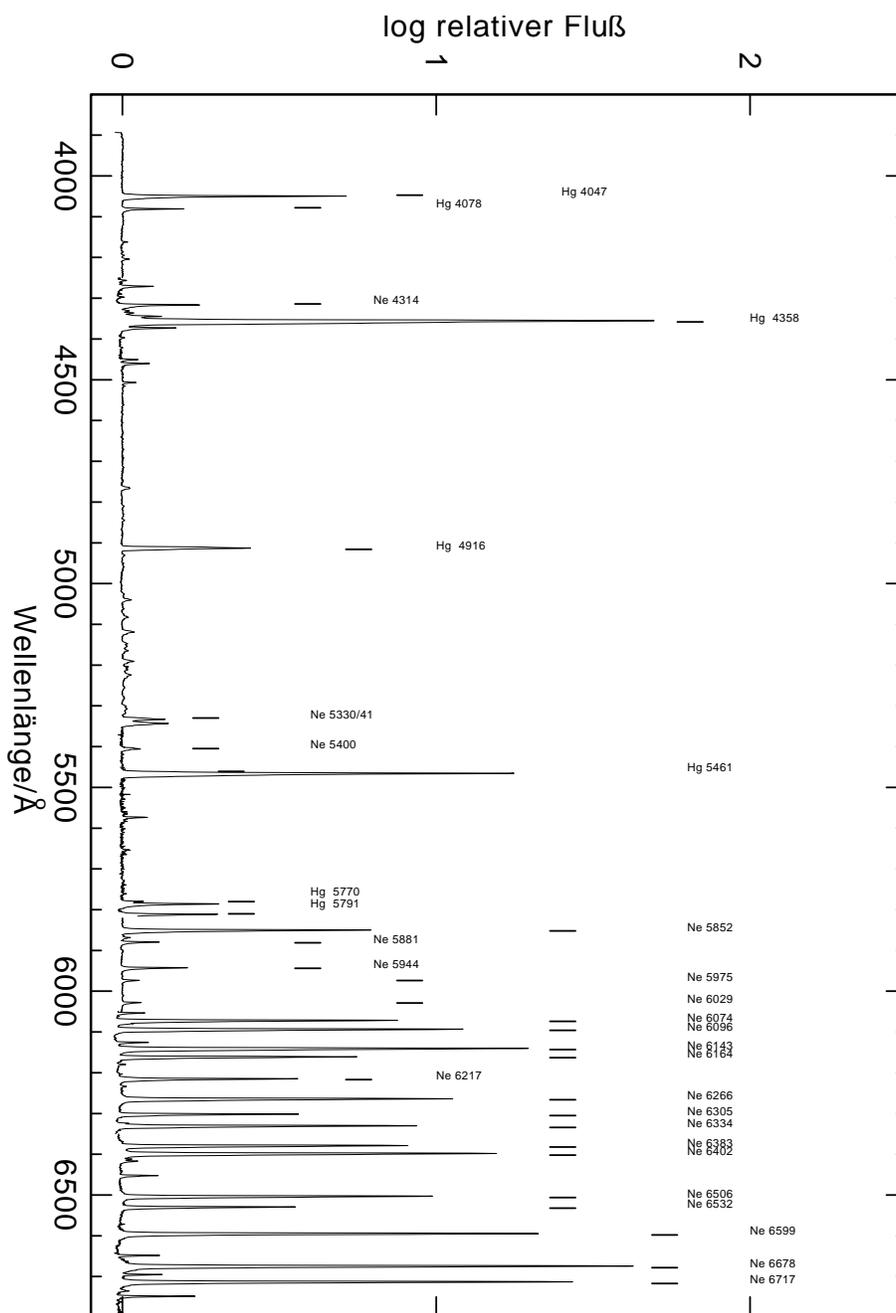


Abbildung A.1: Hg/Ne-Kalibrationsspektrum, aufgenommen mit dem 1200er Gitter.

## A.3 Starke Linien in Sternspektren.

### Wasserstoff

$H_\alpha$	$H_\beta$	$H_\gamma$	$H_\delta$	$H_\epsilon$	$H_\zeta$	$H_\eta$	$H_\theta$
6563 Å	4861 Å	4340 Å	4102 Å	3970 Å	3889 Å	3835 Å	3798 Å

$H_\iota$	$H_\kappa$	$H_{13}$	$H_{14}$	$H_{15}$	$H_{16}$	$H_{17}$	$H_{18}$
3771 Å	3750 Å	3734 Å	3722 Å	3712 Å	3704 Å	3697 Å	3692 Å

### Helium

He I	3820 Å	3965 Å	4009 Å	4026 Å	4144 Å
He I	4387 Å	4471 Å	5876 Å		
He II	3923 Å	4100 Å	4199 Å	4340 Å	4542 Å
He II	4686 Å	4861 Å	5411 Å	6678 Å	

### Kohlenstoff

C II	4267 Å						
C III	4069 Å	4123 Å	4187 Å	4340 Å	4375 Å	4515 Å	4650 Å
C IV	4441 Å	4650 Å	4786 Å				

### Stickstoff

N II	3995 Å	5005 Å	5679 Å
N III	4100 Å	4640 Å	
N IV	4057 Å		

### Sauerstoff

O I	6158 Å							
O II	3749 Å	4119 Å	4317 Å	4320 Å	4349 Å	4415 Å	4417 Å	4649 Å
O III	3444 Å	3760 Å	4069 Å					
O IV	4786 Å							
O V	4123 Å	4157 Å	4187 Å					

**Natrium**

Na I	5890 Å	5896 Å
------	--------	--------

**Silizium**

Si II	4128 Å	4130 Å
Si III	4552 Å	
Si IV	4089 Å	

**Calcium**

Ca I	4227 Å	4289 Å	4303 Å	4435 Å	4455 Å	5016 Å	5262 Å
Ca I	5270 Å	5589 Å	5857 Å	6122 Å	6439 Å	6718 Å	
Ca II	3934 Å	3968 Å					

**Eisen**

Fe I	3930 Å	4005 Å	4045 Å	4064 Å	4144 Å	4250 Å	4260 Å	4272 Å
Fe I	4325 Å	4384 Å	4405 Å	4528 Å	4668 Å	4891 Å	4958 Å	5255 Å
Fe I	5269 Å	5616 Å	6609 Å	6663 Å	6678 Å			
Fe II	3914 Å	3938 Å	3945 Å	4179 Å	4233 Å	4385 Å		

**verschiedene Metalle**

Mg I	3838 Å	5167 Å	5173 Å	5184 Å				
Mg II	4481 Å							
Sc II	4247 Å							
Ti I	4523 Å	4527 Å	4533 Å	4545 Å	4617 Å			
Ti I	4640 Å	4982 Å	5036 Å	6258 Å				
Ti II	4164 Å	4300 Å	4395 Å	4400 Å	4408 Å	4444 Å	4468 Å	
Cr I	4254 Å	4646 Å	4651 Å					
Cr II	4242 Å							
Mn I	3807 Å	4031 Å	4033 Å	4034 Å	4041 Å			
Sr II	4077 Å	4215 Å	4305 Å					
Sr III	4335 Å							
Eu II	4205 Å							

**Moleküle**

CH	CN	CN
4300 Å	3883 Å	4216 Å

TiO	TiO	TiO	TiO	TiO	TiO
4585 Å	4761 Å	4954 Å	5000 Å	5167 Å	6159 Å

**Emissionslinien in Gasnebeln**

[O I]	[O I]	[O I]	[O I]	[O II]
5007 Å	5577 Å	6300 Å	6363 Å	3727 Å

[O III]	[O III]	[O III]	[O III]
4363 Å	4391 Å	4959 Å	5007 Å

[Ne III]	[S II]	[Fe III]	[N I]	[Cl III]	[Cl III]	[N II]	[S II]
3868 Å	4069 Å	4658 Å	5200 Å	5517 Å	5537 Å	5754 Å	6723 Å

**Erdatmosphäre**

O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O				
6280 Å	6867 Å	6875 Å	6906 Å	7594 Å	7165 Å

## A.4 Das Spiegelteleskop des AIT



Abbildung A.2: Der Tübinger 0,8 m Reflektor.

## A.5 Selbstbau-Spektroskop

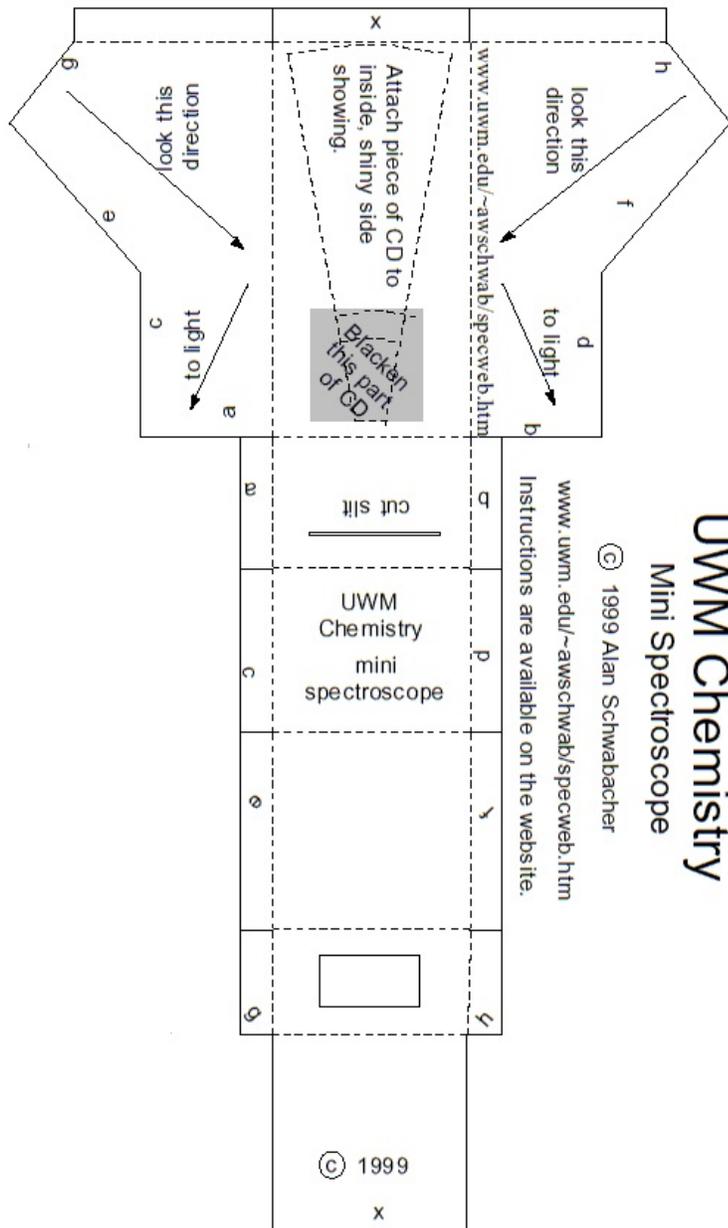


Abbildung A.3: Bastelanleitung für ein Spektroskop.

# Anhang B

## Einführung in IDL

### B.1 Ein paar Worte zu Linux

IDL wird bei uns unter dem Betriebssystem Linux betrieben. Nachdem Sie sich eingeloggt haben bzw. eingeloggt wurden, finden Sie eine graphische Oberfläche mit einem sog. X-Terminal vor. In diesem Terminal können sie per Tastaturbefehle arbeiten, die folgenden Befehle sollten ausreichen:

- wechseln des Verzeichnisses: `cd StellStruct-VL`
- anzeigen des aktuellen Pfades: `pwd`
- Inhalt des Verzeichnisses anschauen: `ls`
- Kopieren einer Datei: `cp Quelldatei Ziel`
- Löschen einer Datei: `rm Datei`

Wechseln Sie in ihr Gruppenverzeichnis. Starten Sie nun IDL, indem Sie „idl“ eintippen. Für die IDL-Hilfe einfach „?“ eintippen, dann kommt in einem separaten Fenster die Online-Hilfe. Graphische Fenster schließen Sie mit dem Befehl „wdelete“. Beenden Sie idl, indem Sie nach dem IDL-Prompt „exit“ eingeben, bitte nicht einfach auf irgendwelche x am Fensterrahmen klicken.

## B.2 Zuweisungen

Auf folgende Weise wird einer Variablen ein Wert zugewiesen:

```
IDL> x = 5.0
IDL> y = 5.0^2 + x
IDL> z = 3.0 * x - 2.0 / y
IDL> w = x * exp(y)
```

Die Ausgabe auf den Bildschirm:

```
IDL> print, x, y, z, w
IDL> print, sqrt(x)
IDL> print, "Ergebnis: ", x
```

Beachten Sie den Unterschied (was passiert?):

```
IDL> print, 5 / 2
IDL> print, 5.0 / 2.0
```

Einlesen einer Zahl, die der Benutzer eintippt:

```
IDL> read, "Geben Sie eine Zahl ein: ", eingabe
IDL> print, eingabe
```

## B.3 Felder

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----

Felder oder Arrays sind ein wichtiges Element jeder Programmiersprache. Anstatt zum Beispiel die Anzahl der Tage eines Monats in 12 Variablen, für jeden Monat eine, abzuspeichern, ist es eleganter, ein Feld mit 12 Einträgen zu belegen. Bei Feldern ist zu beachten, dass IDL bei NULL zu zählen beginnt.

Erzeugung eines 12-zelligen Feldes für ganze Zahlen (integers):

```
IDL> feld1 = intarr(12)
```

Erzeugung eines 12-zelligen Feldes für Fließkommazahlen (floats):

```
IDL> feld2 = ftarr(12)
```

Belegung der ersten Zelle des Feldes mit einem Wert:

```
IDL> feld1(0) = 31
```

Belegung der achten Zelle des Feldes mit einem Wert:

```
IDL> feld1(7) = 31
```

Erzeugung und Belegung eines 4-zelligen Integerfeldes:

```
IDL> feld3 = [1,3,5,7]
```

Ausgabe der dritten Zelle des Feldes:

```
IDL> print, feld3(2)
```

Addition der ersten und vierten Zelle des Feldes:

```
IDL> print, feld3(0) + feld3(3)
```

Erzeugung eines Integerfeldes, gefüllt mit Werten von 0 bis 99:

```
IDL> feld4 = indgen(100)
```

## B.4 Schleifen-Konstrukte

Insbesondere im Umgang mit Feldern sind Schleifen unverzichtbar. Wenn Sie alle 12 Zellen von feld1 mit der Anzahl der Tage des jeweiligen Monats belegt haben (s.o.), können Sie nun die Gesamtzahl der Tage eines Jahres recht einfach berechnen:

```
IDL> tageszahl = 0
```

```
IDL> for i = 0,11 do tageszahl = tageszahl + feld1(i)
```

```
IDL> print, tageszahl
```

Beachten Sie auch hier, dass IDL bei NULL zu zählen beginnt. Schleifen, die mehr als ein Kommando zur Abarbeitung enthalten, müssen als Programm oder Funktion programmiert werden (s.u.).

## B.5 IF-Statements

Oft ist es notwendig, eine bestimmte Operation nur auszuführen, wenn eine bestimmte Bedingung erfüllt ist. Dafür werden sogenannte IF-Statements verwendet (z.B. GT, LT, EQ, GE, LE, NE).

```
IDL> read, zahl
IDL> IF zahl GT 9 THEN print, 'Die eingegebene Zahl war mindestens zweistellig !'
IDL> IF zahl LT 10 THEN print, 'Die eingegebene Zahl war einstellig und/oder negativ !'
IDL> IF zahl EQ 10 THEN print, 'Die eingegebene Zahl war 10 !'
```

IF-Statements und Schleifen-Konstrukte können selbstverständlich beliebig kombiniert und geschachtelt werden.

## B.6 Einfache Plot-Routinen

Erzeugen Sie ein Fließkommazahlen-Feld a, das automatisch belegt ist:

```
IDL> a = findgen(100)
```

Werfen Sie einen Blick auf den Inhalt des Feldes:

```
IDL> print, a
```

Nun ein Plot:

```
IDL> plot, sin(a/10)
```

Darüber ein weiterer Plot (Overlay):

```
IDL> oplot, sin(a/2)
```

Nun erzeugen wir ein weiteres Plot-Fenster:

```
IDL> window,1
```

und plotten mit logarithmischer y-Achse:

```
IDL> plot, a/10,/ylog
```

Löscht das zweite Plot-Fenster:

```
IDL> wdelete,1
```

Jetzt ein Plot mit schöner Achsbeschriftung:

```
IDL> plot, title='Plotversuch', xtitle='x-Achse', ytitle='y-Achse', sin(a/10)
```

Nun schreiben wir in den Plot hinein (Angabe in Dateneinheiten):

```
IDL> xyouts, 10, 30, 'Sinus-Kurven'
```

Nun schreiben wir in den Plot hinein (Angabe in Prozent von Achsenlänge):

```
IDL> xyouts, 0.7, 0.2, 'Sinus-Kurven', /normal
```

Um den Plot in eine Datei zu schreiben, die auf dem Drucker ausgedruckt werden kann, ma-

chen Sie folgendes:

```
IDL> open_print, "NameMeinesPlots.ps", /postscript, /a4, /color
```

Hiermit wird eine Datei im Postscript-Format angelegt, Größe DIN A4, in Farbe. Dann denselben Plotbefehl, mit dem Sie auf den Bildschirm gemalt haben:

```
IDL> plot, sin(a/10)
```

Und dann zum Abschluss

```
IDL> close_print
```

Jetzt haben Sie in Ihrem Verzeichnis eine Datei namens NameMeinesPlots.ps erzeugt. Diese können Sie nun auf einem Drucker ausdrucken, hier am Institut tippen Sie dazu in einem xterm

für den Schwarzweissdrucker: `lpr -Pa120 NameMeinesPlots.ps`

für den Farbdrucker: `lpr -Pa120c NameMeinesPlots.ps`

ein. Wenn Sie jetzt noch herausfinden, wo der Drucker steht...

## B.7 Funktionen

Ein IDL-Programm besteht üblicherweise aus Funktionen und einem Hauptteil, der die Funktionen aufruft. Das Ergebnis der Funktion wird mittels des Befehls „RETURN“ an das aufrufende Programm zurückgegeben. Sowohl die Funktionen als auch das Hauptprogramm werden jeweils durch ein „END“ abgeschlossen. Kommentare werden durch einen Strichpunkt eingeleitet.

Die Datei, die das Programm enthält, muss die Endung .pro besitzen (beispiel.pro) und wird mit Hilfe eines Editors (Emacs) bearbeitet. Gestartet wird das Programm durch  
IDL> .r beispiel.pro

Nun kann auf die enthaltenen Funktionen auch direkt zugegriffen werden:

```
IDL> print, quadratwurzel(9)
```

Übertragen Sie das unten stehende Programm in eine Datei (beispiel-gruppe1.pro), benutzen Sie hierzu Emacs. Die Kommentare sind für Sie gedacht, Sie müssen sie nicht unbedingt abtippen.

Versuchen Sie zu verstehen, was alles passiert, spielen Sie mit dem Programm herum, ändern Sie es nach Ihren Vorstellungen ab.

```
;Hier beginnt das Programm mit Hauptteil und 2 Funktionen

;erste Funktion: berechnet die Quadratwurzel von "inputparameter"
FUNCTION quadratwurzel, inputparameter

    out=sqrt(inputparameter)

    RETURN, out    ;Inhalt von "out" wird an das aufrufende Programm
                  ;als Ergebnis zurueckgegeben

END              ;Ende der Funktion quadratwurzel

;zweite Funktion: berechnet die Anzahl der Tage eines Jahres
;an die Funktion wird ein Feld uebergeben (monat), das fuer
;jeden Monat die Anzahl der Tage enthaelt
FUNCTION tageszahl,monat

    tagejahr = 0

    FOR i=0,11 DO BEGIN
        print,"Monat ",i," wird dazuaddiert."
        tagejahr = tagejahr + monat(i)
    ENDFOR

    RETURN, tagejahr

END              ;Ende der Funktion tageszahl
```

```
;Deklaration eines Integerfeldes, in das die Tage der Monate
;eingelesen wird
monat = intarr(12)

;Einleseschleife der Tage jedes Monats
FOR i=0,11 DO BEGIN

    print,"Anzahl Tage des Monats Nummer",i+1
    read,monatstage
    monat(i)=monatstage

ENDFOR

;Funktionsaufruf
print,"Das Jahr hat ",tageszahl(monat)," Tage."

read,"Geben Sie eine Zahl ein, deren Wurzel berechnet werden soll: ",wurzel

print,"Ergebnis: Wurzel von ",wurzel," ist: ",quadratwurzel(wurzel)

END ;Ende des Programms
```

## B.8 Für Fortgeschrittene...

Der radiale Verlauf der Effektivtemperatur  $T_{\text{eff}}$  in der Akkretionsscheibe eines Kataklysmischen Variablen kann im Rahmen der  $\alpha$ -Theorie geometrisch dünner Akkretionsscheiben beschrieben werden durch

$$T_{\text{eff}}(R) = \left( \frac{3GM_1\dot{M}}{8\pi\sigma R^3} \left( 1 - \left( \frac{R_1}{R} \right)^{1/2} \right) \right)^{1/4}. \quad (\text{B.1})$$

Hierbei sind  $M_1$  und  $R_1$  Masse und Radius des Primärsterns,  $\dot{M}$  die Massenakkretionsrate,  $R$  der radiale Abstand,  $G$  die Gravitationskonstante und  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante.

- Schreiben Sie ein Programm, um den radialen Verlauf von  $T_{\text{eff}}$  für verschiedene Massenakkretionsraten (z.B.  $10^{-8}$ ,  $10^{-9}$ ,  $10^{-10}$ ,  $10^{-11} \text{ M}_\odot/\text{yr}$ ) und verschiedene Primärsterne ( $0.6 < M_1 < 1.2 \text{ M}_\odot$ ) zu berechnen.
- Stellen Sie graphisch folgende Abhängigkeiten der Effektivtemperatur dar
  1. von  $\dot{M}$  bei gleichem Primärstern
  2. von  $M_1$  und  $R_1$  bei gleichem  $\dot{M}$
- Der maximale äußere Radius der Akkretionsscheibe entspricht dem sog. Gezeitenradius  $r_{\text{tidal}}$ . Gezeitenwechselwirkung mit dem Sekundärstern verhindert ein weiteres Anwachsen der Scheibe. Für den Gezeitenradius lässt sich näherungsweise schreiben:

$$r_{\text{tidal}} = 0.6 \frac{a}{1+q} \quad (\text{B.2})$$

Hierbei sind  $q$  das Massenverhältnis  $M_2/M_1$  und  $a$  der Separationsradius, der sich aus dem Keplerschen Gesetz

$$4\pi^2 a^3 = G(M_1 + M_2)P^2$$

ergibt.

- Verwenden Sie für den Primärstern die Masse-Radius-Relation für Weiße Zwerge (`/home/prakt/Atmos-VL`). Nehmen Sie für den Sekundärstern eine Masse von  $M_2 = 0.2 \text{ M}_\odot$  und für das System eine Orbitalperiode von  $P = 4 \text{ h}$  an, der Innenrand der Akkretionsscheibe sitzt bei 1.1 Primärsternradien.