

Formelsammlung

Matthias Quintern

10. Januar 2025

Inhaltsverzeichnis

I	Mathematik	1
1	Lineare Algebra	1
1.1	Matrizen Basics	1
1.1.1	Transponierte Matrix	1
1.2	Determinante	1
1.3	math:linalg:misc	2
1.4	Eigenwerte	2
2	Geometrie	3
2.1	Trigonometrie	3
2.2	Verschiedene Theoreme	3
2.2.1	Wertetabelle	4
3	Analysis	4
3.1	Faltung / Konvolution	4
3.2	Fourieranalyse	5
3.2.1	Fourierreihe	5
3.2.2	Fouriertransformation	5
3.3	Verschiedenes	5
3.4	Logarithmus	6
3.5	Integralrechnung	6
3.5.1	Liste nützlicher Integrale	6
4	Wahrscheinlichkeitstheorie	7
4.1	Verteilungen	8
4.1.1	Gauß/Normal-Verteilung	8
4.1.2	Cauchy / Lorentz-Verteilung	9
4.1.3	Binomialverteilung	9
4.1.4	Poissonverteilung	10
4.1.5	Maxwell-Boltzmann Verteilung	10
4.2	Zentraler Grenzwertsatz	10
4.3	Fehlerfortpflanzung	10
II	Mechanik	12
5	Verschiedenes	12
6	Lagrange Formalismus	12

III	Statistische Mechanik	13
7	Entropie	13
IV	Thermodynamik	14
8	Prozesse	14
8.1	Irreversible Gasexpansion (Gay-Lussac-Versuch)	14
9	Phasenübergänge	14
9.0.1	Osmose	15
9.1	Materialeigenschaften	15
10	Hauptsätze der Thermodynamik	16
10.1	Nullter Hauptsatz	16
10.2	Erster Hauptsatz	16
10.3	Zweiter Hauptsatz	16
10.4	Dritter Hauptsatz	16
11	Ensembles	17
11.1	Potentiale	17
12	Ideales Gas	17
12.0.1	Molekülgas	18
13	Reales Gas	19
13.1	Virialentwicklung	19
13.2	Van der Waals Gleichung	19
14	Ideales Quantengas	20
14.1	Bosonen	22
14.2	Fermionen	22
14.2.1	Starke Entartung	23
V	Elektrodynamik	24
15	Hall-Effekt	24
15.1	Klassischer Hall-Effekt	24
15.2	Ganzahliger Quantenhalleffekt	24
16	Dipol-zeug	25
17	Elektrisches Feld	25
18	Magnetfeld	26
18.1	Magnetische Materialien	27
19	Elektromagnetismus	28
19.1	Maxwell-Gleichungen	28
19.2	Induktion	28
VI	Quantenmechanik	29

20 Basics	29
20.1 Operatoren	29
20.1.1 Messung	29
20.1.2 Pauli-Matrizen	29
20.2 Wahrscheinlichkeitstheorie	29
20.3 Kommutator	30
21 Schrödingergleichung	30
21.1 Zeitentwicklung	31
21.1.1 Schrödinger- und Heisenberg-Bild	31
21.1.2 Ehrenfest-Theorem	31
21.2 Korrespondenzprinzip	32
22 Störungstheorie	32
23 Harmonischer Oszillator	32
23.1 Erzeugungs und Vernichtungsoperatoren / Leiteroperatoren	33
23.1.1 Harmonic Oscillator	33
24 Drehmoment	33
24.1 Aharanov-Bohm Effekt	34
25 Periodische Potentiale	34
26 Symmetrien	34
26.1 Zeitumkehrungssymmetrie	34
27 Zwei-Niveau System (TLS)	35
28 Sonstiges	35
29 Wasserstoffatom	35
29.1 Korrekturen	36
29.1.1 Darwin-Term	36
29.1.2 Spin-Bahn-Kopplung (LS-Kopplung)	36
29.1.3 Feinstruktur	36
29.1.4 Lamb-Shift	37
29.1.5 Hyperfeinstruktur	37
29.2 Effekte im Magnetfeld	37
29.3 Sonstiges	37
VII Festkörperphysik	38
30 Kristalle	38
30.1 Bravais-Gitter	38
30.2 Reziprokes Gitter	40
30.3 Streuprozesse	40
30.4 Gitter	41
31 Freies Elektronengase	41
31.1 2D Elektronengas	42
31.2 1D Elektronengas / Quantendraht	42
31.3 0D Elektronengase / Quantenpunkt	42

32 Ladungstransport	42
32.1 Drude-Modell	42
32.2 Sommerfeld-Modell	43
32.3 Boltzmann-Transport	43
32.4 misc	43
33 Supraleitung	44
33.1 London-Gleichungen	44
33.2 Ginzburg-Landau Theorie (GLAG)	44
33.3 Mikroskopische Theorie	45
33.4 BCS-Theorie	45
34 Halbleiter	45
35 Bändermodell	45
35.1 Hybridorbitale	45
36 Diffusion	46
37 misc	46
38 Messtechniken	47
38.1 ARPES	47
38.2 Rastersondenmikroskopie (SPM)	47
39 Herstellungsmethoden	47
39.1 Epitaxie	47
VIII Topologische Materialien	49
40 Berry-Phase / Geometrische Phase	49
IX Quantencomputing	50
41 Qubits	50
42 Gates	50
43 Supraleitende qubits	50
43.1 Bauelemente	50
43.1.1 Josephson-Kontakt	50
43.1.2 SQUID	50
43.2 TODO	51
43.3 Cooper Paar Box (QPB) Qubit	51
43.4 Transmon Qubit	52
43.4.1 Tunable Transmon Qubit	52
43.5 Phase Qubit	53
43.6 Flux Qubit	53
43.7 Fluxonium Qubit	54
44 Zwei-Niveau System	55
44.1 Ramsey Interferometrie	55
45 Noise und Dekohärenz	55

X Computergestützte Physik	56
46 Quanten-Vielteilchenphysik	56
46.1 Importance sampling / Stichprobenentnahme nach Wichtigkeit	56
46.2 Matrix Produktzustände	56
47 Electronic structure theory	56
47.1 Tight-binding	56
47.2 Dichtefunktionaltheorie (DFT)	56
47.2.1 Hartree-Fock	56
48 Atomic dynamics	57
48.1 Kohn-Sham	57
48.2 Born-Oppenheimer Näherung	57
48.3 Molekulardynamik	57
49 Gradientenverfahren	57
50 Physikalische Größen	57
50.1 SI-Basisgrößen	57
50.2 Mechanik	58
50.3 Thermodynamik	58
50.4 Elektrodynamik	58
50.5 Sonstige	58
51 Konstanten	58
XI Chemie	60
52 Periodensystem	60
53 stuff	60
XII Anhang	61
54 Liste der Elemente	61

Teil I

Mathematik

1 Lineare Algebra

1.1 Matrizen Basics

Matrix-Matrix Produkt als Summe

$$C_{ij} = \sum_k A_{ik} B_{kj} \quad (1)$$

Matrix-Vektor Produkt als Summe

$$\vec{c}_i = \sum_j A_{ij} \vec{b}_j \quad (2)$$

Symmetrische matrix

$$A^T = A \quad (3)$$

A $n \times n$ matrix

Unitäre Matrix

$$U^\dagger U = \mathbb{1} \quad (4)$$

1.1.1 Transponierte Matrix

Summe

$$(A + B)^T = A^T + B^T \quad (5)$$

Produkt

$$(AB)^T = B^T A^T \quad (6)$$

Inverse

$$(A^{-1})^T = (A^T)^{-1} \quad (7)$$

Exponential

$$\exp(A^T) = (\exp A)^T \quad (8)$$

$$\ln(A^T) = (\ln A)^T \quad (9)$$

1.2 Determinante

2x2 Matrix

$$\det \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = ad - cb \quad (10)$$

3x3 Matrix (Regel von Sarrus)

$$\det \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix} = aei + bfg + cdh - gec - hfa - idb \quad (11)$$

Leibniz-Formel

$$\det(A) = \sum_{\sigma \in S_n} \left(\text{sgn}(\sigma) \prod_{i=1}^n a_{i,\sigma(i)} \right) \quad (12)$$

Produkt

$$\det(AB) = \det(A) \det(B) \quad (13)$$

Inverse	$\det(A^{-1}) = \det(A)^{-1} \quad (14)$
---------	--

Transponiert	$\det(A^T) = \det(A) \quad (15)$
--------------	----------------------------------

1.3 math:linalg:misc

Normal equation Solves a linear regression problem	$\underline{\theta} = (\underline{X}^T \underline{X})^{-1} \underline{X}^T \underline{\bar{y}} \quad (16)$ <p>$\underline{\theta}$ hypothesis / weight matrix, \underline{X} design matrix, $\underline{\bar{y}}$ output vector</p>
---	--

Inverse 2×2 Matrix	$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{ad - bc} \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix} \quad (17)$
-----------------------------	---

Singulärwertzerlegung Faktorisierung einer reellen oder komplexen Matrix durch Rotation \rightarrow Skalierung \rightarrow Rotation.	$A = U \Lambda V \quad (18)$ <p>A: $m \times n$ matrix, U: $m \times m$ unitary matrix, Λ: $m \times n$ rectangular diagonal matrix with non-negative numbers on the diagonal, V: $n \times n$ unitary matrix</p>
---	---

2D Rotationsmatrix	$R = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (19)$
--------------------	--

3D Rotationsmatrizen	$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (20)$
	$R_y = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (21)$
	$R_z = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (22)$

Eigenschaften von Rotationsmatrizen	$R^T = R^{-1} \quad (23)$
	$\det R = 1 \quad (24)$
	$R \in \text{SO}(n) \quad (25)$
n Dimension, $\text{SO}(n)$ spezielle orthogonale Gruppe	

1.4 Eigenwerte

Eigenwert-Gleichung	$A v = \lambda v \quad (26)$
λ Eigenwert, v Eigenvektor	

Charakteristisches Polynom Nullstellen sind die Eigenwerte von A	$\chi_A = \det(A - \lambda \mathbb{1}) \stackrel{!}{=} 0 \quad (27)$
Kramers-Theorem Wenn H invariant unter T ist und $ \psi\rangle$ ein Eigenzustand von H ist, dann ist $T \psi\rangle$ auch ein Eigenzustand von H	$THT^\dagger = H \quad \wedge \quad H \psi\rangle = E \psi\rangle \quad \Rightarrow \quad HT \psi\rangle = ET \psi\rangle \quad (28)$
Eigenwertzerlegung	$A = V\Lambda V^{-1} \quad (29)$ A diagonalisierbar, Spalten von V sind die Eigenvektoren v_i , Λ Diagonalmatrix mit Eigenwerten λ_i auf der Diagonalen

TODO: Jordan stuff, blockdiagonal matrices, permutations, skalar product lapacescher entwicklungssatz maybe, cramers rule

2 Geometrie

2.1 Trigonometrie

Exponentialfunktion	$\exp(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} \quad (30)$
---------------------	---

Sinus	$\sin(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{(2n+1)}}{(2n+1)!} \quad (31)$
	$= \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i} \quad (32)$

Kosinus	$\cos(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{(2n)}}{(2n)!} \quad (33)$
	$= \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2} \quad (34)$

Sinus hyperbolicus	$\sinh(x) = -i \sin ix \quad (35)$
	$= \frac{e^x - e^{-x}}{2} \quad (36)$

Kosinus hyperbolicus	$\cosh(x) = \cos ix \quad (37)$
	$= \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad (38)$

2.2 Verschiedene Theoreme

Hypothenuse im Einheitskreis	$1 = \sin^2 x + \cos^2 x \quad (39)$
------------------------------	--------------------------------------

Additionstheoreme

$$\sin(x \pm y) = \sin x \cos y \pm \cos x \sin y \quad (40)$$

$$\cos(x \pm y) = \cos x \cos y \mp \sin x \sin y \quad (41)$$

$$\tan(x \pm y) = \frac{\sin(x \pm y)}{\cos(x \pm y)} = \frac{\tan x \pm \tan y}{1 \mp \tan x \tan y} \quad (42)$$

Doppelwinkelfunktionen

$$\sin 2x = 2 \sin x \cos x \quad (43)$$

$$\cos 2x = \cos^2 x - \sin^2 x = 1 - 2 \sin^2 x \quad (44)$$

$$\tan 2x = \frac{2 \tan x}{1 - \tan^2 x} \quad (45)$$

Sonstige

$$\cos x + b \sin x = \sqrt{1 + b^2} \cos(x - \theta) \quad (46)$$

$$\tan \theta = b$$

2.2.1 Wertetabelle

Grad	0°	30°	45°	60°	90°	120°	180°	270°
Rad	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\sqrt{\pi}}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	π	$\frac{3\pi}{2}$
$\sin(x)$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	0	-1
$\cos(x)$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	-1	0
$\tan(x)$	0	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{2}$	∞	$-\sqrt{3}$	0	∞

3 Analysis

3.1 Faltung / Konvolution

Die Faltung ist **kommutativ**, **assoziativ** und **distributiv**

Definition

$$(f * g)(t) = f(t) * g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t - \tau) d\tau \quad (47)$$

Notation

$$f(t) * g(t - t_0) = (f * g)(t - t_0) \quad (48)$$

$$f(t - t_0) * g(t - t_0) = (f * g)(t - 2t_0) \quad (49)$$

Kommutativität

$$f * g = g * f \quad (50)$$

Assoziativität]

$$(f * g) * h = f * (g * h) \quad (51)$$

Distributivität

$$f * (g + h) = f * g + f * h \quad (52)$$

Komplexe konjugation

$$(f * g)^* = f^* * g^* \quad (53)$$

3.2 Fourieranalyse

3.2.1 Fourierreihe

Fourierreihe
Komplexe Darstellung

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \exp\left(\frac{2\pi i k t}{T}\right) \quad (54)$$

$f \in \mathcal{L}^2(\mathbb{R}, \mathbb{C})$ T -periodic

Fourierkoeffizienten
Komplexe Darstellung

$$c_k = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \exp\left(-\frac{2\pi i}{T} k t\right) dt \quad \text{für } k \geq 0 \quad (55)$$

$$c_{-k} = \overline{c_k} \quad \text{if } f \text{ reellwertig} \quad (56)$$

Fourierreihe
Sinus und Kosinus
Darstellung

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos\left(\frac{2\pi}{T} k t\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi}{T} k t\right) \right) \quad (57)$$

$f \in \mathcal{L}^2(\mathbb{R}, \mathbb{C})$ T -periodic

Fourierkoeffizienten
Sinus und Kosinus
Darstellung

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos\left(-\frac{2\pi}{T} k t\right) dt \quad \text{für } k \geq 0 \quad (58)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin\left(-\frac{2\pi}{T} k t\right) dt \quad \text{für } k \geq 1 \quad (59)$$

Wenn f punktsymmetrisch:
 $a_{k>0} = 0$, wenn f
achsensymmetrisch: $b_k = 0$

$$a_k = c_k + c_{-k} \quad \text{für } k \geq 0 \quad (60)$$

$$b_k = i(c_k - c_{-k}) \quad \text{für } k \geq 1 \quad (61)$$

TODO:cleanup

3.2.2 Fouriertransformation

Fouriertransformierte

$$\hat{f}(k) := \frac{1}{\sqrt{2\pi}^n} \int_{\mathbb{R}^n} e^{-ikx} f(x) dx \quad (62)$$

$\hat{f}: \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{C}, \forall f \in L^1(\mathbb{R}^n)$

für $f \in L^1(\mathbb{R}^n)$:

i) $f \mapsto \hat{f}$ linear in f

ii) $g(x) = f(x - h) \Rightarrow \hat{g}(k) = e^{-ikh} \hat{f}(k)$

iii) $g(x) = e^{ihx} f(x) \Rightarrow \hat{g}(k) = \hat{f}(k - h)$

iv) $g(\lambda) = f\left(\frac{x}{\lambda}\right) \Rightarrow \hat{g}(k) \lambda^n \hat{f}(\lambda k)$

3.3 Verschiedenes

Stirlingformel

$$\ln(N!) \approx N \ln(N) - N + \mathcal{O}(\ln(N)) \quad (63)$$

Fehlerfunktion
 $\operatorname{erf} : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ und
 komplementäre
 Fehlerfunktion erfc

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (64)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) \quad (65)$$

$$= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \quad (66)$$

Dirac-Delta einer Funktion

$$\delta(f(x)) = \frac{\delta(x - x_0)}{|g'(x_0)|} \quad (67)$$

$$g(x_0) = 0$$

3.4 Logarithmus

Logarithmus Identitäten

$$\log(xy) = \log(x) + \log(y) \quad (68)$$

$$\log\left(\frac{x}{y}\right) = \log(x) - \log(y) \quad (69)$$

$$\log(x^d) = d \log(x) \quad (70)$$

$$\log(\sqrt[y]{x}) = \frac{\log(x)}{y} \quad (71)$$

$$x^{\log(y)} = y^{\log(x)} \quad (72)$$

Integral des natürlichen
 Logarithmus

$$\int \ln(x) dx = x(\ln(x) - 1) \quad (73)$$

$$\int \ln(ax + b) dx = \frac{ax + b}{a} (\ln(ax + b) - 1) \quad (74)$$

3.5 Integralrechnung

Partielle integration

$$\int_a^b f'(x) \cdot g(x) dx = [f(x) \cdot g(x)]_a^b - \int_a^b f(x) \cdot g'(x) dx \quad (75)$$

Integration durch
 Substitution

$$\int_a^b f(g(x)) g'(x) dx = \int_{g(a)}^{g(b)} f(z) dz \quad (76)$$

Satz von Gauss
 Divergenz in einem Volumen
 ist gleich dem Fluss durch die
 Oberfläche

$$\iiint_V (\vec{\nabla} \cdot \vec{F}) dV = \iint_A \vec{F} \cdot d\vec{A} \quad (77)$$

$$A = \partial V$$

Klassischer Satz von Stokes

$$\int_A (\vec{\nabla} \times \vec{F}) \cdot d\vec{S} = \oint_S \vec{F} \cdot d\vec{r} \quad (78)$$

$$S = \partial A$$

3.5.1 Liste nützlicher Integrale

cal:log:integral

Arkussinus, Arkuskosinus,
Arkustangens

$$\int \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} dx = \arcsin x \quad (79)$$

$$\int -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}} dx = \arccos x \quad (80)$$

$$\int \frac{1}{x^2+1} dx = \arctan x \quad (81)$$

Arcsinh, arccosh, arctanh

$$\int \frac{1}{\sqrt{x^2+1}} dx = \operatorname{arsinh} x \quad (82)$$

$$\int \frac{1}{\sqrt{x^2-1}} dx = \operatorname{arcosh} x \quad \text{für } (x > 1) \quad (83)$$

$$\int \frac{1}{1-x^2} dx = \operatorname{artanh} x \quad \text{für } (|x| < 1) \quad (84)$$

$$\int \frac{1}{1-x^2} dx = \operatorname{arcoth} x \quad \text{für } (|x| > 1) \quad (85)$$

Kugelkoordinaten

$$x = r \sin \phi, \cos \theta \quad (86)$$

$$y = r \cos \phi, \cos \theta \quad (87)$$

$$z = r \sin \theta \quad (88)$$

Integration in
Kugelkoordinaten

$$\iiint dx dy dz = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^\pi dr d\phi d\theta r^2 \sin \theta \quad (89)$$

Riemannsche Zeta-Funktion

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s} = \frac{1}{(1-2^{1-s})\Gamma(s)} \int_0^\infty d\eta \frac{\eta^{(s-1)}}{e^\eta+1} \quad (90)$$

TODO:differential equation solutions

4 Wahrscheinlichkeitstheorie

Mittelwert
Erwartungswert

$$\langle x \rangle = \int w(x) x dx \quad (91)$$

Varianz
Quadrat
der Standardabweichung

$$\sigma^2 = (\Delta \hat{x})^2 = \langle \hat{x}^2 \rangle - \langle \hat{x} \rangle^2 = \langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle \quad (92)$$

Kovarianz

$$\operatorname{cov}(x, y) = \sigma(x, y) = \sigma_{XY} = \langle (x - \langle x \rangle) (y - \langle y \rangle) \rangle \quad (93)$$

Standardabweichung

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{(\Delta x)^2} \quad (94)$$

Median
Teilt die untere von der
oberen Hälfte

$$\operatorname{med}(x) = \begin{cases} x_{(n+1)/2} & n \text{ ungerade} \\ \frac{x_{(n/2)} + x_{((n/2)+1)}}{2} & n \text{ gerade} \end{cases} \quad (95)$$

x Reihe mit n Elementen

Wahrscheinlichkeitsdichte-
funktion
Zufallsvariable hat Dichte f .
Das Integral gibt
Wahrscheinlichkeit an, dass X
einen Wert $x \in [a, b]$ annimmt

$$P([a, b]) := \int_a^b f(x) dx \quad (96)$$

f normalisiert $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$

Kumulative
Verteilungsfunktion

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \quad (97)$$

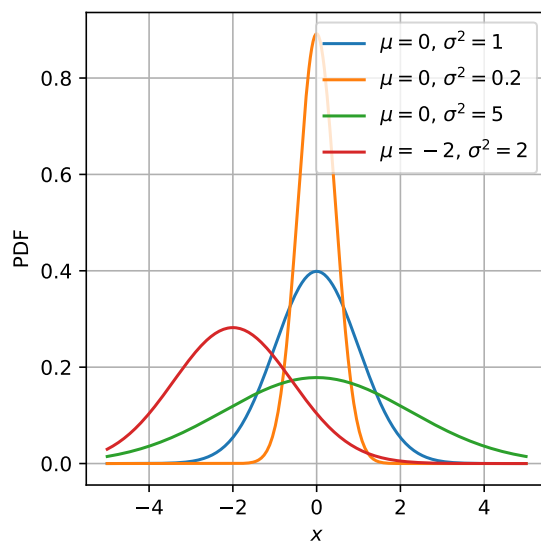
f Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

Autokorrelation
Korrelation von f zu sich
selbst zu einem früheren
Zeitpunkt. C ist auch die
Kovarianzfunktion

$$C_A(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(t+\tau)f(t) dt = \langle f(t+\tau) \cdot f(t) \rangle \quad (98)$$

4.1 Verteilungen

4.1.1 Gauß/Normal-Verteilung

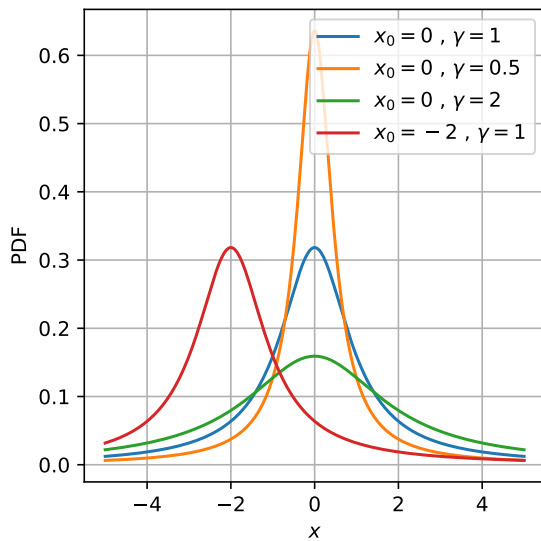


parameters	$\mu \in \mathbb{R}, \sigma^2 \in \mathbb{R}$
support	$x \in \mathbb{R}$
pdf	$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$
cdf	$\frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x-\mu}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right]$
mean	μ
median	μ
variance	σ^2

Dichtefunktion der
Standard-Normalverteilung
 $\mu = 0, \sigma = 1$

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} \quad (99)$$

4.1.2 Cauchy / Lorentz-Verteilung

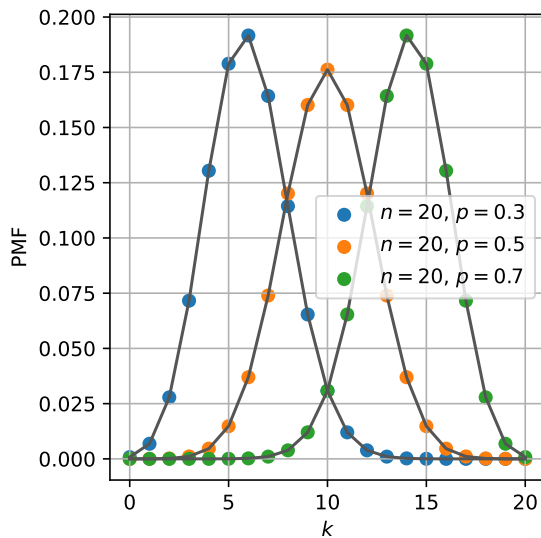


parameters	$x_0 \in \mathbb{R}, \quad \gamma \in \mathbb{R}$
support	$x \in \mathbb{R}$
pdf	$\frac{1}{\pi\gamma \left[1 + \left(\frac{x-x_0}{\gamma} \right)^2 \right]}$
cdf	$\frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{x-x_0}{\gamma} \right) + \frac{1}{2}$
mean	undefined
median	x_0
variance	undefined

Auch bekannt als **Cauchy-Lorentz Verteilung**, **Lorentz Funktion**, **Breit-Wigner Verteilung**.

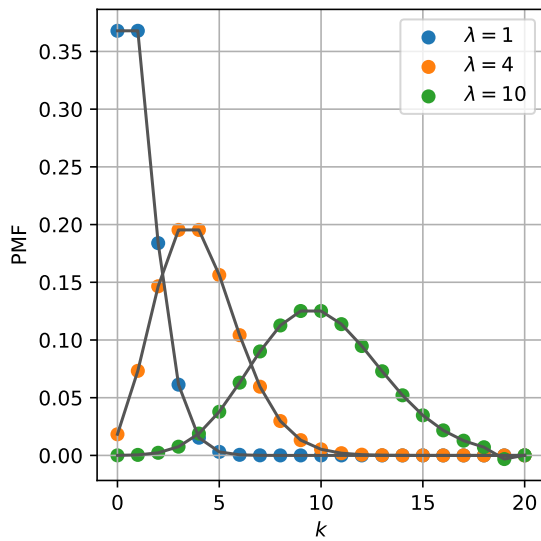
4.1.3 Binomialverteilung

Geht die Zahl der Versuche gegen unendlich ($n \rightarrow \infty$), konvergiert die Binomialverteilung gegen die Poissonverteilung



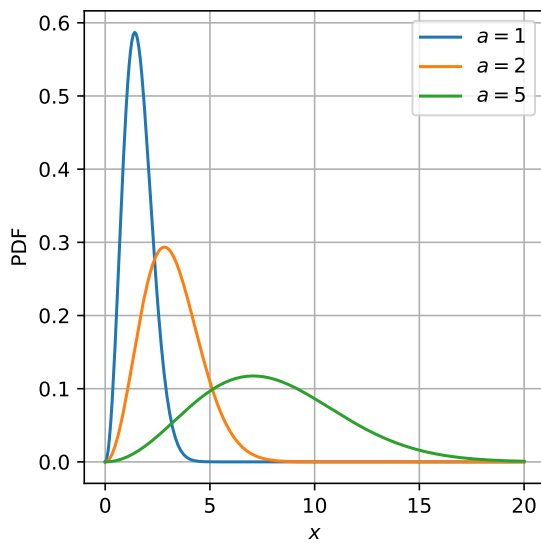
parameters	$n \in \mathbb{Z}, \quad p \in [0, 1], \quad q = 1 - p$
support	$k \in \{0, 1, \dots, n\}$
pmf	$\binom{n}{k} p^k q^{n-k}$
mean	np
median	$\lfloor np \rfloor$ or $\lceil np \rceil$
variance	$npq = np(1 - p)$

4.1.4 Poissonverteilung



parameters	$\lambda \in (0, \infty)$
support	$k \in \mathbb{N}$
pmf	$\frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$
cdf	$e^{-\lambda} \sum_{j=0}^{\lfloor k \rfloor} \frac{\lambda^j}{j!}$
mean	λ
median	$\approx \left\lfloor \lambda + \frac{1}{3} - \frac{1}{50\lambda} \right\rfloor$
variance	λ

4.1.5 Maxwell-Boltzmann Verteilung



parameters	$a > 0$
support	$x \in (0, \infty)$
pdf	$\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{x^2}{a^3} \exp\left(-\frac{x^2}{2a^2}\right)$
cdf	$\text{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2a}}\right) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{x}{a} \exp\left(-\frac{x^2}{2a^2}\right)$
mean	$2a \frac{2}{\pi}$
median	
variance	$\frac{a^2(3\pi - 8)}{\pi}$

4.2 Zentraler Grenzwertsatz

Sei X_1, X_2, \dots eine Reihe unabhängiger und gleichverteilter Zufallsvariablen mit $\langle X_i \rangle = \mu$ und $(\Delta X_i)^2 = \sigma^2 < \infty$. Für N gegen unendlich konvergieren die Zufallsvariablen $\sqrt{N}(\bar{X}_N - \mu)$ zu einer Normalverteilung $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$.

Das bedeutet, dass die Schwankung mit $\frac{1}{\sqrt{N}}$ wächst und Aussagen für große N scharf werden.

4.3 Fehlerfortpflanzung

Generalisiertes Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$V_y = J(x) \cdot V_x \cdot J^T(x) \quad (100)$$

V Kovarianz matrix, J math:cal:jacobi-matrix

Fortpflanzung unabhängiger
fehlerbehaftete Größen
Lineare Näherung

$$u_y = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot u_i \right)^2} \quad (101)$$

Gewicht
Varianz ist eine mögliche
Wahl für ein Gewicht

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (102)$$

σ Varianz

Gewichteter Mittelwert

$$\bar{x} = \frac{\sum_i (x_i w_i)}{\sum_i w_i} \quad (103)$$

w_i Gewicht

Varianz des gewichteten
Mittelwertes

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{\sum_i w_i} \quad (104)$$

w_i Gewicht

Teil II

Mechanik

5 Verschiedenes

Hookesches Gesetz

$$F = D\Delta l \quad (105)$$

F Kraft, D Federkonstante, Δl Federlänge

6 Lagrange Formalismus

Der Lagrange-Formalismus ist oft der einfachste Weg die Bewegungsgleichungen zu erhalten, da das Aufstellen der Lagrange-Funktion mit geeigneten generalisierten Koordinaten oft relativ einfach ist.

Die generalisierten Koordinaten werden so gewählt, dass die Zwangsbedingungen automatisch erfüllt sind. Zum Beispiel findet man für ein 2D Pendel die generalisierte Koordinate $q = \varphi$, mit $\vec{x} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix}$.

Lagrange-Funktion

$$\mathcal{L} = T - V \quad (106)$$

T kinetische Energie, V potentielle Energie

Lagrange-Gleichungen
(zweiter Art)

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = 0 \quad (107)$$

q generalisierte Koordinaten

Kanonischer Impuls

$$p = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} \quad (108)$$

Hamiltonian

Den Hamiltonian bekommt man aus dem Lagrangian über eine Legendre Transformation

$$H(q, p) = p\dot{q} - \mathcal{L}(q, \dot{q}(q, p)) \quad (109)$$

TODO:Legendre trafo

Teil III

Statistische Mechanik

Extensive Größen: Additiv für Subsysteme (Systemgrößenabhängig): $S(\lambda E, \lambda V, \lambda N) = \lambda S(E, V, N)$

Intensive Größen: Unabhängig der Systemgröße, Verhältnis zweier extensiver Größen

Liouville-Gleichung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \rho}{\partial q_i} \frac{\partial H}{\partial p_i} - \frac{\partial \rho}{\partial p_i} \frac{\partial H}{\partial q_i} \right) = \{H, \rho\} \quad (110)$$

$\{\}$ Poisson-Klammer

7 Entropie

Positiv Definit und Additiv

$$S \geq 0 \quad (111)$$

$$S(E_1, E_2) = S_1 + S_2 \quad (112)$$

Von-Neumann

$$S = -k_B \langle \log \rho \rangle = -k_B \text{tr}(\rho \log \rho) \quad (113)$$

ρ Dichtematrix

Gibbs

$$S = -k_B \sum_n p_n \log p_n \quad (114)$$

p_n Wahrscheinlichkeit für Mikrozustand n

Boltzmann

$$S = k_B \log \Omega \quad (115)$$

Ω #Mikrozustände

Temperatur

$$\frac{1}{T} := \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right)_V \quad (116)$$

Druck

$$p = T \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_E \quad (117)$$

Teil IV

Thermodynamik

Thermische Wellenlänge

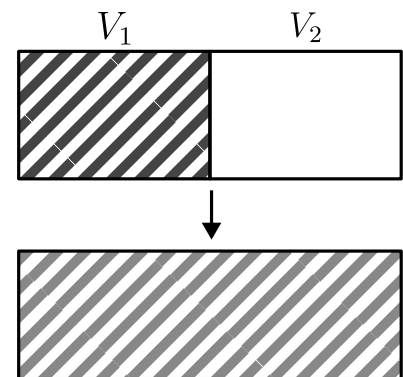
$$\lambda = \frac{\hbar}{\sqrt{2\pi mk_B T}} \quad (118)$$

8 Prozesse

- **isobar**: konstanter Druck $p = \text{const}$
- **isochor**: konstantes Volumen $V = \text{const}$
- **isotherm**: konstante Temperatur $T = \text{const}$
- **isentrop**: konstante Entropie $S = \text{const}$
- **isenthalp**: konstante Enthalpie $H = \text{const}$
- **adiabatisch**: kein Wärmeübertrag $\Delta Q = 0$
- **quasistatisch**: läuft so langsam ab, dass das System durchgehend im t.d Equilibrium bleibt
- **reversibel**: reversible Prozesse sind immer quasistatisch und es wird keine Entropie erzeugt $\Delta S = 0$

8.1 Irreversible Gasexpansion (Gay-Lussac-Versuch)

Ein klassisches Gas in einem System mit Volumen V_1 ist getrennt von einem zweiten System mit Volumen V_2 . Beim Gay-Lussac Versuch wird die Trennwand entfernt und das Gas fließt in das Volumen V_2 .



Entropieänderung

$$\Delta S = Nk_B \ln\left(\frac{V_1 + V_2}{V_1}\right) > 0 \quad (119)$$

TODO:Reversible

TODO:Quasistatischer T-Ausgleich

TODO:Joule-Thompson Prozess

9 Phasenübergänge

Ein Phasenübergang ist eine Unstetigkeit in der Freien Energie F oder in der Gibbs-Energie G oder in ihrer Ableitungen. Die Ordnung des Phasenübergangs ist die Ordnung der Ableitung, in welcher die Unstetigkeit auftritt.

Latente Wärme

Für den Phasenübergang von

Phase 1 nach Phase 2

benötigte Wärme

$$Q_L = T\Delta S \quad (120)$$

ΔS Entropieänderung des Phasenübergangs

Clausius-Clapeyron Gleichung Steigung der Phasengrenzlinie	$\frac{dp}{dT} = \frac{Q_L}{T\Delta V} \quad (121)$ ΔV Volumenänderung des Phasenübergangs
Phasenübergang Im Koexistenzbereich	$G_1 = G_2 \quad (122)$ und damit $\mu_1 = \mu_2 \quad (123)$
Gibbsche Phasenregel	$f = c - p + 2 \quad (124)$ c #Komponenten, f #Freiheitsgrade, p #Phasen

9.0.1 Osmose

Osmosis ist die spontane Passage oder Diffusion Lösungsmittelmolekülen durch eine semi-permeable Membran die für das Lösungsmittel, jedoch nicht die darin gelösten Stoffe durchlässig ist. Die Richtung der Diffusion ist vom Gebiet mit hohem chemischen Potential (niedrigere Konzentration des gelösten Stoffes) in das mit niedrigem chemischem Potential (höhere Konzentration des gelösten Stoffes), sodass die Konzentration des gelösten Stoffes ausgeglichen wird.

Osmotischer Druck / Van-t-hoff'sches Gesetz	$p_{\text{osm}} = k_B T \frac{N_c}{V} \quad (125)$ N_c #gelöster Teilchen
--	---

9.1 Materialeigenschaften

Wärmekapazität	$c = \frac{Q}{\Delta T} \quad (126)$ Q Wärme
Isochore Wärmekapazität	$c_v = \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V \quad (127)$ U innere Energie
Isobare Wärmekapazität	$c_p = \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)_P = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \quad (128)$ H Enthalpie
Kompressionsmodul	$K = -V \frac{dp}{dV} \quad (129)$ p Druck, V Anfangsvolumen
Kompressibilität	$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} \quad (130)$

Isotherme Kompressibilität

$$\kappa_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T = \frac{1}{K} \quad (131)$$

Adiabatische Kompressibilität

$$\kappa_S = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_S \quad (132)$$

Thermaler
Ausdehnungskoeffizient

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_{p,N} \quad (133)$$

10 Hauptsätze der Thermodynamik

10.1 Nullter Hauptsatz

Wenn sich zwei Systeme jeweils im thermischen Gleichgewicht mit einem dritten befinden, befinden sie sich auch untereinander im thermischen Gleichgewicht.

$$A \overset{th.GGW.}{\leftrightarrow} C \wedge B \overset{th.GGW.}{\leftrightarrow} C \Rightarrow A \overset{th.GGW.}{\leftrightarrow} B \quad (134)$$

10.2 Erster Hauptsatz

In einem abgeschlossenen System ist die Änderung der inneren Energie U gleich der gewonnenen Wärme Q minus der vom System an der Umgebung verrichteten Arbeit W .

Änderung der inneren Energie

$$\Delta U = \delta Q - \delta W \quad (135)$$

$$dU = T dS - p dV \quad (136)$$

10.3 Zweiter Hauptsatz

Clausius: Es gibt keine Zustandsänderung, deren einziges Ergebnis die Übertragung von Wärme von einem Körper niedriger Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur ist.

Kelvin: Es ist unmöglich, eine periodisch arbeitende Maschine zu konstruieren, die weiter nichts bewirkt als Hebung einer Last und Abkühlung eines Wärmereservoirs.

10.4 Dritter Hauptsatz

Es ist unmöglich, ein System bis zum absoluten Nullpunkt abzukühlen.

Entropiedichte

$$\lim_{T \rightarrow 0} s(T) = 0 \quad (137)$$

und damit auch

$$\lim_{T \rightarrow 0} c_V = 0 \quad (138)$$

$$s = \frac{S}{N}$$

11 Ensembles

Tabelle 1: caption

	\fqname :mk	\fqname :k	\fqname :gk
variables	E, V, N	T, V, N	T, V, μ
partition_sum	$\Omega = \sum_n 1$	$Z = \sum_n e^{-\beta E_n}$	$Z_g = \sum_n e^{-\beta(E_n - \mu N_n)}$
probability	$p_n = \frac{1}{\Omega}$	$p_n = \frac{e^{-\beta E_n}}{Z}$	$p_n = \frac{e^{-\beta(E_n - \mu N_n)}}{Z_g}$
td_pot	$S = k_B \ln \Omega$	$F = -k_B T \ln Z$	$\Phi = -k_B T \ln Z$
pressure	$p = T \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_{E, N}$	$p = - \left(\frac{\partial F}{\partial V} \right)_{T, N}$	$p = - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial V} \right)_{T, \mu} = - \frac{\Phi}{V}$
entropy	$S = k_B \ln \Omega$	$S = - \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_{V, N}$	$S = - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial T} \right)_{V, \mu}$

Ergodenhypothese
Innerhalb einer langen
Zeitspanne sind alle
energetisch erreichbaren
Mikrozustände im
Phasenraum gleich
wahrscheinlich

$$\langle A \rangle_{\text{Zeit}} = \langle A \rangle_{\text{Ensemble}} \quad (139)$$

A Messgröße

11.1 Potentiale

Innere Energie

$$dU(S, V, N) = T dS - p dV + \mu dN \quad (140)$$

Freie Energie / Helmholtz
Energie

$$dF(T, V, N) = -S dT - p dV + \mu dN \quad (141)$$

Enthalpie

$$dH(S, p, N) = T dS + V dp + \mu dN \quad (142)$$

Freie Entahlpie /
Gibbs-Energie

$$dG(T, p, N) = -S dT + V dp + \mu dN \quad (143)$$

Großkanonisches Potential

$$d\Phi(T, V, \mu) = -S dT - p dV - N d\mu \quad (144)$$

TODO:Maxwell Relationen, TD Quadrat

Themodynamisches Quadrat

$-S$	U	V
H		F
$-p$	G	T

Die Ecken gegenüber

des Potentials sind die Koeffizienten, das Differential eines Koeffizienten ist in der Ecke gegenüber.

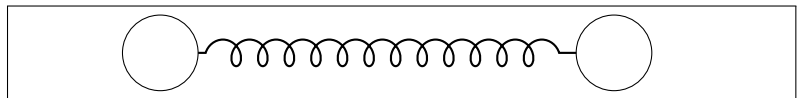
12 Ideales Gas

Das ideale Gas besteht aus nicht-wechselwirkenden, ununterscheidbaren Teilchen.

Phase space volume 3N Kugel	$\Omega(E) = \int_V d^3q_1 \dots \int_V d^3q_N \int d^3p_1 \dots \int d^3p_N \frac{1}{N! h^{3N}} \Theta\left(E - \sum_i \frac{\vec{p}_i^2}{2m}\right) \quad (145)$ $= \left(\frac{V}{N}\right)^N \left(\frac{4\pi m E}{3h^2 N}\right)^{\frac{3N}{2}} e^{-\frac{5N}{2}} \quad (146)$ <p>N #Teilchen, h^{3N} Volumen eines Mikrozustandes, $N!$ Teilchen sind ununterscheidbar</p>
Entropie	$S = \frac{5}{2} N k_B + N k_B \ln \left(\frac{V}{N} \left(\frac{2\pi m E}{3h^2 N} \right)^{\frac{3}{2}} \right) \quad (147)$
Ideale Gasgleichung	$pV = nRT \quad (148)$ $= N k_B T \quad (149)$
Kalorische Zustandsgleichung	$U = \frac{3}{2} N k_B T \quad (150)$
Äquipartitionstheorem Jedem Freiheitsgrad steht die Energie U_D zur Verfügung	$U_D = \frac{1}{2} k_B T \quad (151)$
Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung Siehe auch ??	$w(v) dv = 4\pi \left(\frac{\beta m}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{\beta m v^2}{2}} dv \quad (152)$
Mittlere quadratosche Geschwindigkeit pro Teilchen im 3D-Gas	$\langle v^2 \rangle = \int_0^\infty dv v^2 w(v) = \frac{3k_B T}{m} \quad (153)$

12.0.1 Molekülgas

Molekülgas
2 Teilchen der Masse M sind verbunden durch eine "Feder" mit Länge L



Translation	$p_i = \frac{2\pi\hbar}{L} n_i \quad (154)$ $E_{\text{kin}} = \frac{\vec{p}_r^2}{2M} \quad (155)$ <p>$n_i \in \mathbb{N}_0, i = x, y, z$</p>
Schwingungen	$E_{\text{vib}} = \hbar\omega \left(n + \frac{1}{2} \right) \quad (156)$ <p>$n \in \mathbb{N}_0$</p>

Rotation

$$E_{\text{rot}} = \frac{\hbar^2}{2I} j(j+1) \quad (157)$$

$j \in \mathbb{N}_0$

TODO:Diagram für verschiedene Temperaturen, Weiler Skript p.83

13 Reales Gas

13.1 Virialentwicklung

Entwicklung desw Drucks p in eine Potenzreihe der Dichte ρ .

Virialentwicklung

Der zweite und dritte

Virialkoeffizient ist für viele

Substanzen tabelliert

$$p = k_B T \rho [1 + B(T)\rho + C(T)\rho^2 + \dots] \quad (158)$$

B und C 2. und 3. Virialkoeffizient, $\rho = \frac{N}{V}$

Mayer-Funktion

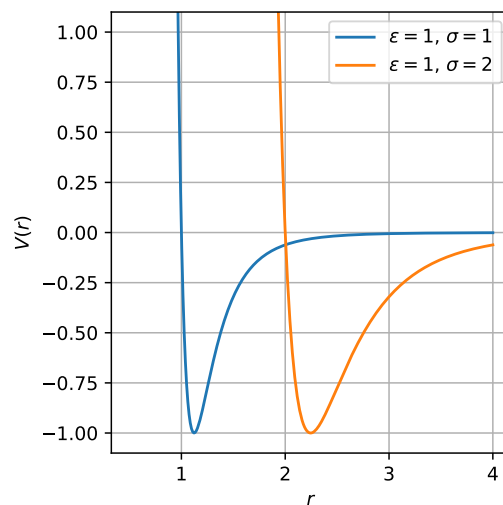
$$f(\vec{r}) = e^{-\beta V(i,j)} - 1 \quad (159)$$

$V(i, j)$ Paarpotential

Zweiter Virialkoeffizient
Hängt vom Paarpotential
zweier Moleküle ab

$$B = -\frac{1}{2} \int_V d^3\vec{r} f(\vec{r}) \quad (160)$$

Lennard-Jones-Potential
Potential zwischen zwei
Molekülen. Attraktiv für
 $r > \sigma$, repulsiv für $r < \sigma$.
In Festkörpern: Anziehung
durch Landau-Dispersion und
Abstoßung durch
Pauli-Prinzip.



$$V(r) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \quad (161)$$

13.2 Van der Waals Gleichung

Annahme eines Harte-Kugeln Potentials mit einer schwachen Anziehung

Zustandssumme

$$Z_N = \frac{(V - V_0)^N}{\lambda^{3N} N!} e^{\frac{\beta N^2 a}{V}} \quad (162)$$

a Kohäsionsdruck

Van der Waals-Gleichung

$$p = \frac{Nk_B T}{V - b} - \frac{N^2 a}{V^2} \quad (163)$$

b Kovolumen

TODO:sometimes N is included in a, b

14 Ideales Quantengas

Fugazität

$$z = e^{\mu/\beta} = e^{\frac{\mu}{k_B T}} \quad (164)$$

Besetzungszahl

$$\sum_r n_r = N \quad (165)$$

r Zustände

Ununterscheidbare Teilchen

$$|p_1, p_2, \dots, p_N\rangle = |p_1\rangle |p_2\rangle \dots |p_N\rangle \quad (166)$$

p_i Zustand

Anwenden des Paritätsoperators gibt eine *symmetrische* (Bosonen) und eine *antisymmetrische* (Fermionen) Lösung

$$\hat{P}_{12}\psi(p_i(\vec{r}_1), p_j(\vec{r}_2)) = \pm\psi(p_i(\vec{r}_1), p_j(\vec{r}_2)) \quad (167)$$

\hat{O}_{12} Paritätsoperator tauscht 1 und 2, \pm : $\begin{matrix} \text{bos} \\ \text{fer} \end{matrix}$

Spinentartungsfaktor

$$g_s = 2s + 1 \quad (168)$$

s Spin

Zustandsdichte

$$g(\epsilon) = g_s \frac{V}{4\pi} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\epsilon} \quad (169)$$

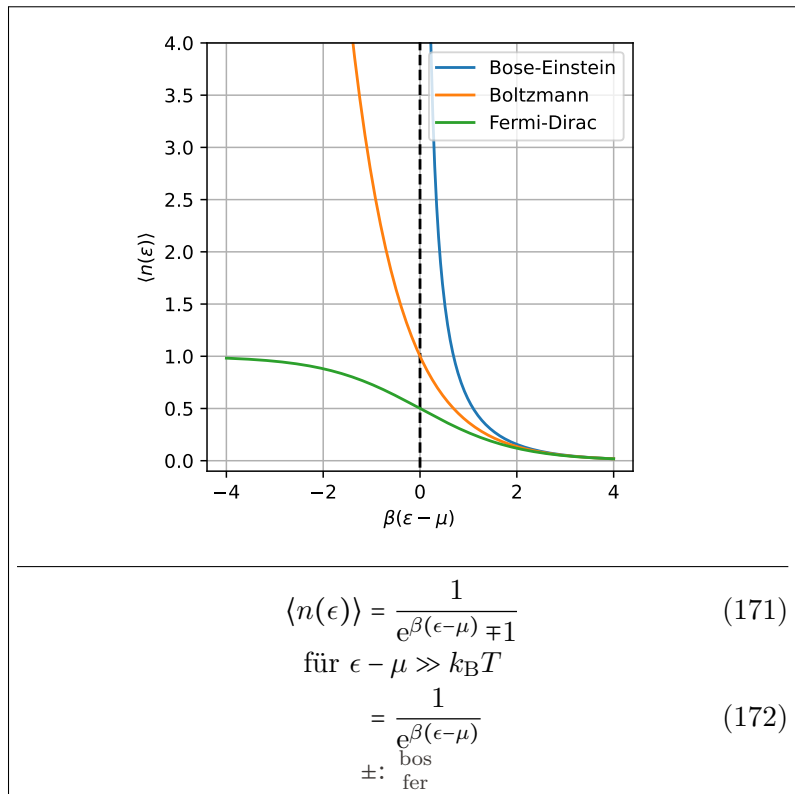
g_s Spinentartungsfaktor

Besetzungszahl pro Energie

$$n(\epsilon) d\epsilon = \frac{g(\epsilon)}{e^{\beta(\epsilon-\mu)} \mp 1} d\epsilon \quad (170)$$

Zustandsdichte, \pm : $\begin{matrix} \text{bos} \\ \text{fer} \end{matrix}$

Besetzungszahl



Teilchenzahl

$$\langle N \rangle = \int_0^\infty n(\epsilon) d\epsilon \quad (173)$$

Energie

Gleich wie beim klassischen idealen Gas

$$\langle E \rangle = \int_0^\infty \epsilon n(\epsilon) d\epsilon = \frac{3}{2} pV \quad (174)$$

Zustandsgleichung

Bosonen: verringerter Druck da sie clustern

Fermionen: erhöhter Druck durch das Pauli-Prinzip

$$pV = k_B T \ln Z_g \quad (175)$$

after Virialentwicklung

$$= N k_B T \left[1 \mp \frac{\lambda^3}{2^{5/2} g v} + \mathcal{O} \left(\left(\frac{\lambda^3}{v} \right)^2 \right) \right] \quad (176)$$

\pm : $\begin{matrix} \text{bos} \\ \text{fer} \end{matrix}$, $v = \frac{V}{N}$ spezifisches Volumen

Relevanz der qm. Korrekturen

Korrekturen werden relevant, wenn der Teilchenabstand in der Größenordnung der thermischen Wellenlänge ist

$$\left(\frac{V}{N} \right)^{\frac{1}{3}} \sim \frac{\lambda}{g_s^{\frac{1}{3}}} \quad (177)$$

Verallgemeinerte Zeta-Funktion

$$\left. \begin{matrix} g_\nu(z) \\ f_\nu(z) \end{matrix} \right\} := \frac{1}{\Gamma(\nu)} \int_0^\infty dx \frac{x^{\nu-1}}{e^x z^{-1} \mp 1} \quad (178)$$

14.1 Bosonen

Zustandssumme

$$Z_g = \prod_p \frac{1}{1 - e^{-\beta(\epsilon_p - \mu)}} \quad (179)$$

$p \in \mathbb{N}_0$

Besetzungszahl
Bose-Einstein Verteilung

$$\langle n_p \rangle = \frac{1}{e^{\beta(\epsilon - \mu)} - 1} \quad (180)$$

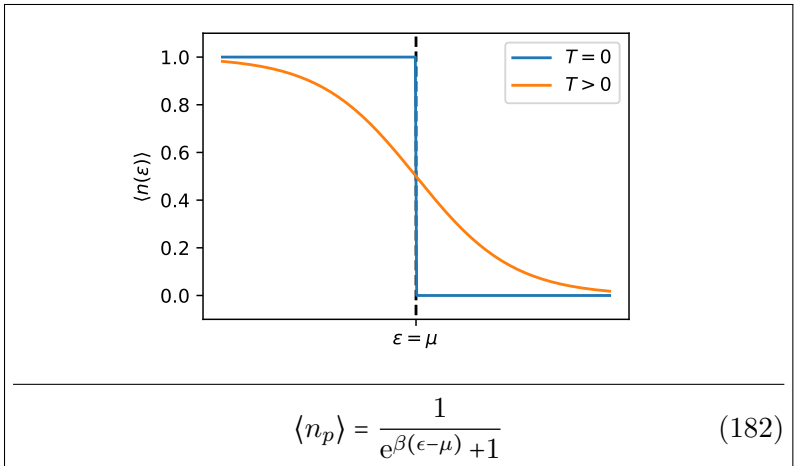
14.2 Fermionen

Zustandssumme

$$Z_g = \prod_p \left(1 + e^{-\beta(\epsilon_p - \mu)} \right) \quad (181)$$

$p = 0, 1$

Besetzungszahl
Fermi-Dirac Verteilung



$$\langle n_p \rangle = \frac{1}{e^{\beta(\epsilon - \mu)} + 1} \quad (182)$$

Slater-Determinante

$$\psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N) = \frac{1}{\sqrt{N!}} \begin{vmatrix} p_1(\vec{r}_1) & p_2(\vec{r}_1) & \dots & p_N(\vec{r}_1) \\ p_1(\vec{r}_2) & p_2(\vec{r}_2) & \dots & p_N(\vec{r}_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_1(\vec{r}_N) & p_2(\vec{r}_N) & \dots & p_N(\vec{r}_N) \end{vmatrix} \quad (183)$$

Fermienergie

$$\epsilon_F := \mu(T = 0) \quad (184)$$

Fermi Temperatur

$$T_F := \frac{\epsilon_F}{k_B} \quad (185)$$

Fermi-Impuls
Radius der *Fermi-Kugel* im
Impulsraum. Zustände mit P_F
sind auf der *Fermi-Fläche*

$$p_F = \hbar k_F = (2mE_F)^{\frac{1}{2}} \quad (186)$$

Spezifische Dichte

$$v = \frac{N}{V} = \frac{g}{\lambda^3} f_{3/2}(z) \quad (187)$$

f Verallgemeinerte Zeta-Funktion, g Entartungsfaktor, z Fugazität

14.2.1 Starke Entartung

Sommerfeld-Entwicklung
für geringe Temperaturen
 $T \ll T_F$

$$f_\nu(z) = \frac{(\ln z)^\nu}{\Gamma(\nu+1)} \left(1 + \frac{\pi^6}{6} \frac{\nu(\nu-1)}{(\ln z)^2} + \dots \right) \quad (188)$$

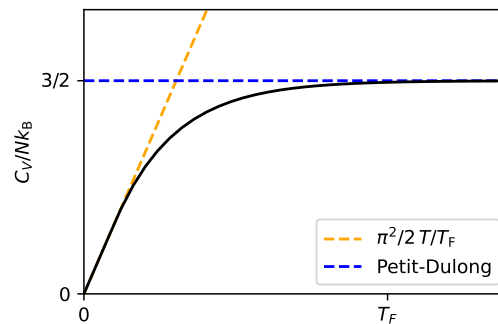
Energiedichte

$$\frac{E}{V} = \frac{3}{2} \frac{g}{\lambda^3} k_B T f_{5/2}(z) \quad (189)$$

Sommerfeld-Entwicklung

$$\approx \frac{3}{5} \frac{N}{V} E_F \left(1 + \frac{5\pi^2}{12} \left(\frac{k_B T}{E_F} \right)^2 \right) \quad (190)$$

Wärmecapacity
für geringe Temperaturen
 $T \ll T_F$



$$C_V = \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_V = N k_B \frac{\pi}{2} \left(\frac{T}{T_F} \right) \quad (191)$$

weicht ab vom td:TODO:petit_dulong

TODO:Entartung und Sommerfeld TODO:DULONG-PETIT Gesetz

Teil V

Elektrodynamik

15 Hall-Effekt

Zyklotronfrequenz

$$\omega_c = \frac{eB}{m_e} \quad (192)$$

TODO:Move

15.1 Klassischer Hall-Effekt

Fließt in einem Leiter ($l \times b \times d$) ein Strom in x Richtung, während der Leiter von einem Magnetfeld B in z -Richtung durchdrungen, wird eine Hallspannung U_H in y -Richtung induziert.

Hallspannung

$$U_H = \frac{IB}{ned} \quad (193)$$

n Ladungsträgerdichte

Hall-Koeffizient
Manchmal R_H

$$A_H := -\frac{E_y}{j_x B_z} \stackrel{\text{metals}}{=} \frac{1}{ne} = \frac{\rho_{xy}}{B_z} \quad (194)$$

Spezifischer Widerstand

$$\rho_{xx} = \frac{m_e}{ne^2\tau} \quad (195)$$

$$\rho_{xy} = \frac{B}{ne} \quad (196)$$

15.2 Ganzzahliger Quantenhalleffekt

Leitfähigkeitstensor

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{pmatrix} \quad (197)$$

Spezifischer
Widerstands-tensor

$$\rho = \sigma^{-1} \quad (198)$$

Spezifischer Hallwiderstand

$$\rho_{xy} = \frac{2\pi\hbar}{e^2} \frac{1}{\nu} \quad (199)$$

$\nu \in \mathbb{Z}$ Füllfaktor

Fraktionaler
Quantum-Hall-Effekt

$$\nu = \frac{1}{3}, \frac{2}{5}, \frac{3}{7}, \frac{2}{3}, \dots \quad (200)$$

ν Bruch aus Zahlen ohne gemeinsamen Teiler

- **Integer** (QHE): Füllfaktor ν ist ganzzahlig
- **Fractional** (FQHE): Füllfaktor ν ist ein Bruch
- **Spin** (QSHE): Spin Ströme anstatt Ladungsströme

- **Anomalous** (QAHE): Symmetriebruch durch interne Effekte anstatt durch ein externes Magnetfeld

TODO:sort

Impedanz eines Kondensators

$$Z_C = \frac{1}{i\omega C} \quad (201)$$

Impedanz eines Induktors

$$Z_L = i\omega L \quad (202)$$

TODO:impedance addition for parallel / linear

16 Dipol-zeug

Dipolstrahlung
Poynting-Vektor

$$\vec{S} = \left(\frac{\mu_0 p_0^2 \omega^4}{32\pi^2 c} \right) \frac{\sin^2 \theta}{r^2} \vec{r} \quad (203)$$

Zeitlich mittlere Leistung

$$P = \frac{\mu_0 \omega^4 p_0^2}{12\pi c} \quad (204)$$

17 Elektrisches Feld

Elektrisches Feld
Umgibt geladene Teilchen

Symbol: $\vec{\mathcal{E}}$
Unit: $1 \text{ V m}^{-1} = 1 \text{ kgm/s}^3 \text{ A}$

Gaußsches Gesetz für elektrische Felder
Der magnetische Fluss durch eine geschlossene Fläche ist proportional zur elektrischen Ladung

$$\Phi_E = \iint_S \vec{\mathcal{E}} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (205)$$

S geschlossene Fläche

Permittivität
Dielektrische Konstante
Elektrische Polarisierbarkeit eines dielektrischen Materials

Symbol: ϵ
Unit: $1 \text{ A s V}^{-1} \text{ m} = 1 \text{ F m}^{-1} = 1 \text{ C V}^{-1} \text{ m} = 1 \text{ C}^2/\text{Nm}^2 = 1 \text{ A}^2 \text{ s}^4/\text{kgm}^3$

Relative Permittivität /
Dielectric constant

$$\epsilon(\omega)_r = \frac{\epsilon(\omega)}{\epsilon_0} \quad (206)$$

ϵ Permittivität, ϵ_0 Vakuum Permittivität

Vakuum Permittivität
Elektrische Feldkonstante

Symbol: ϵ_0
Experimenteller Wert
 $8.8541878188(14) \cdot 10^{-12} \text{ A s V}^{-1} \text{ m}$

Elektrische Suszeptibilität
Beschreibt wie stark ein dielektrisches Material polarisiert wird, wenn ein elektrisches Feld angelegt wird

Symbol: χ_e
Unit:

$$\epsilon_r = 1 + \chi_e \quad (207)$$

ϵ_r Relative Permittivität / Dielectric constant

Dielektrische Polarisationsdichte	$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{\mathcal{E}} \quad (208)$
	ϵ_0 Vakuum Permittivität, χ_e Elektrische Suszeptibilität, $\vec{\mathcal{E}}$ Elektrisches Feld

18 Magnetfeld

Magnetischer Fluss	Symbol: Φ_B Unit: $1 \text{ Wb} = 1 \text{ V s}^{-1} = 1 \text{ kgm}^2/\text{s}^2 \text{ A}$
	$\Phi_B = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (209)$
	\vec{A} Fläche

Magnetische Flussdichte Definiert über Lorentzkraft	Symbol: \vec{B} Unit: $1 \text{ T} = 1 \text{ Vs}/\text{m}^2 = 1 \text{ N A}^{-1} \text{ m} = 1 \text{ kg}/\text{As}^2$
	$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (210)$
	\vec{H} Magnetische Feldstärke, \vec{M} Magnetisierung, μ_0 Magnetische Vakuumpermeabilität

Magnetische Feldstärke	Symbol: \vec{H} Unit: 1 A m^{-1}
	$\vec{H} \equiv \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M} \quad (211)$

Lorentzkraft Kraft auf geladenes Teilchen	$\vec{F} = q\vec{\mathcal{E}} + q\vec{v} \times \vec{B} \quad (212)$
--	--

Magnetisch Permeabilität	Symbol: μ Unit: $1 \text{ H m}^{-1} = 1 \text{ V s A}^{-1} \text{ m}$
	$\mu = \frac{B}{H} \quad (213)$
	B Magnetische Flussdichte, H Magnetische Feldstärke

Magnetische Vakuumpermeabilität	Symbol: μ_0 Experimenteller Wert $1.25663706127(20) \text{ H/m} = \text{N/A}^2$
------------------------------------	---

Realtive Permeabilität	$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (214)$
------------------------	---

Gaußsches Gesetz für Magnetismus
 Der magnetische Fluss durch eine geschlossene Fläche ist 0
 ⇒ es gibt keine magnetischen Monopole

$$\Phi_B = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (215)$$

S geschlossene Fläche

Magnetisierung
 Vektorfeld, welches die Dichte von magnetischen Dipolen beschreibt.

Symbol: \vec{M}
 Unit: 1 A m^{-1}

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dV} = \chi_m \cdot \vec{H} \quad (216)$$

Magnetisches Moment
 Stärke und Richtung eines magnetischen Dipols

Symbol: \vec{m}
 Unit: 1 Am^2

Drehmoment

$$\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B} \quad (217)$$

m Magnetisches Moment

Suszeptibilität

$$\chi_m = \frac{\partial M}{\partial B} = \mu_r - 1 \quad (218)$$

μ_r Relative Permeabilität

18.1 Magnetische Materialien

Paramagnetismus
 Magnetisches Feld wird im Material verstärkt

$$\mu_r > 1 \quad (219)$$

$$\chi_m > 0 \quad (220)$$

μ Magnetisch Permeabilität, χ_m Suszeptibilität

Diamagnetismus
 Magnetisches Feld wird aus dem Material gedrängt

$$0 < \mu_r < 1 \quad (221)$$

$$-1 < \chi_m < 0 \quad (222)$$

μ Magnetisch Permeabilität, χ_m Suszeptibilität

Ferromagnetismus
 Magnetische Momente werden am äußeren Feld ausgerichtet und behalten diese Ausrichtung auch wenn das Feld abgeschaltet wird (Remanenz)

$$\mu_r \gg 1 \quad (223)$$

μ Magnetisch Permeabilität, χ_m Suszeptibilität

19 Elektromagnetismus

Lightgeschwindigkeit
in the vacuum

Symbol: c
Experimenteller Wert
 $299792458 \text{ m s}^{-1}$

Vakuum Permittivität -
Permeabilität Beziehung
TODO:Does this have a
name?

$$\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2} \quad (224)$$

ϵ_0 Vakuum Permittivität, μ_0 Magnetische Vakuumpermeabilität, c Lightgeschwindigkeit

Poisson Gleichung in der
Elektrostatik

$$\Delta \Phi(\vec{r}) = -\frac{\rho(\vec{r})}{\epsilon} \quad (225)$$

TODO:double check Φ
 ρ Ladungsdichte, ϵ Permittivität, Φ Potential

Poynting-Vektor
Gerichteter Energiefluss oder
Leistungsfluss eines
elektromagnetischen Feldes
[W/m²]

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (226)$$

19.1 Maxwell-Gleichungen

Vakuum
Mikroskopische Formulierung

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathcal{E}} = \frac{\rho_{\text{el}}}{\epsilon_0} \quad (227)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (228)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathcal{E}} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (229)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \frac{1}{c^2} \frac{d\vec{\mathcal{E}}}{dt} \quad (230)$$

Materie
Makroskopische Formulierung

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_{\text{el}} \quad (231)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (232)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathcal{E}} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (233)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (234)$$

TODO:Polarization

19.2 Induktion

Faradaysche Induktionsgesetz

$$U_{\text{ind}} = -\frac{d}{dt} \Phi_B = -\frac{d}{dt} \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (235)$$

Lenzsche Regel

Die Änderung des magnetischen Flußes durch einen Leiter induziert einen Strom der der Änderung entgegenwirkt.

Teil VI

Quantenmechanik

20 Basics

20.1 Operatoren

Dirac-Notation	$\langle x \text{ "Bra" Zeilenvektor} \quad (236)$ $ x\rangle \text{ "Ket" Spaltenvektor} \quad (237)$ $\hat{A} \beta\rangle = \alpha\rangle \Rightarrow \langle\alpha = \langle\beta \hat{A}^\dagger \quad (238)$
Dagger	$\hat{A}^\dagger = (\hat{A}^*)^T \quad (239)$ $(c\hat{A})^\dagger = c^* \hat{A}^\dagger \quad (240)$ $(\hat{A}\hat{B})^\dagger = \hat{B}^\dagger \hat{A}^\dagger \quad (241)$ $\quad (242)$
Adjungierter operator	$\langle\alpha \hat{A}^\dagger \beta\rangle = \langle\beta \hat{A} \alpha\rangle^* \quad (243)$
Hermitescher operator	$\hat{A} = \hat{A}^\dagger \quad (244)$

20.1.1 Messung

Eine Observable ist ein hermitescher Operator, der auf \hat{H} wirkt. Die Messung ergibt zufällig einen der Eigenwerte von \hat{O} , welche alle reell sind.

Messwahrscheinlichkeit Wahrscheinlichkeit, ψ im Zustand λ zu messen	$p(\lambda) = \langle\psi \hat{P}_\lambda \psi\rangle \quad (245)$
--	--

Zustand nach der Messung	$ \psi\rangle_{\text{post}} = \frac{1}{\sqrt{p(\lambda)}} \hat{P}_\lambda \psi\rangle \quad (246)$
--------------------------	---

20.1.2 Pauli-Matrizen

Pauli Matrizen	$\text{TODO : remove macro2} \quad (247)$
----------------	---

20.2 Wahrscheinlichkeitstheorie

Kontinuitätsgleichung	$\frac{\partial\rho(\vec{x}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{j}(\vec{x}, t) = 0 \quad (248)$ <p>ρ Dichte einer Erhaltungsgröße q, j Fluß von q</p>
-----------------------	---

Zustandswahrscheinlichkeit	$\text{TODO} \quad (249)$
----------------------------	---------------------------

Dispersion	$\Delta \hat{A} = \hat{A} - \langle \hat{A} \rangle$	(250)
Allgemeine Unschärferelation	$\sigma_A \sigma_B \geq \frac{1}{4} \langle [\hat{A}, \hat{B}] \rangle^2$	(251)
	$\sigma_A \sigma_B \geq \frac{1}{2} \langle [\hat{A}, \hat{B}] \rangle $	(252)

20.3 Kommutator

Kommutator	$[A, B] = AB - BA$	(253)
Antikommutator	$\{A, B\} = AB + BA$	(254)
Kommutatorrelationen	$[A, BC] = [A, B]C - B[A, C]$	(255)
TODO:add some more?		
Kommutator mit einer Funktion	$[f(A), B] = [A, B] \frac{\partial f}{\partial A}$ falls $[A, [A, B]] = 0$	(256)
Jakobi-Identität	$[A, [B, C]] + [B, [C, A]] + [C, [A, B]] = 0$	(257)
Lemma von Hadamard	$e^A B e^{-A} = B + [A, B] + \frac{1}{2!} [A, [A, B]] + \frac{1}{3!} [A, [A, [A, B]]] + \dots$	(258)
Kanonische Vertauschungsrelationen	$[x_i, x_j] = 0$	(259)
	$[p_i, p_j] = 0$	(260)
	$[x_i, p_j] = i\hbar \delta_{ij}$	(261)
x, p kanonische konjugierte		

21 Schrödingergleichung

Energieoperator	$E = i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$	(262)
Impulsoperator	$\vec{p} = -i\hbar \vec{\nabla}_x$	(263)
Ortsoperator	$\vec{x} = i\hbar \vec{\nabla}_p$	(264)
Stationäre Schrödingergleichung	$\hat{H} \psi\rangle = E \psi\rangle$	(265)

Schrödinger-Gleichung

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(x, t) = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + \vec{V}(x) \right) \psi(x) \quad (266)$$

21.1 Zeitentwicklung

The time evolution of the Hamiltonian is given by:

Zeitentwicklungsoperator

$$|\psi(t)\rangle = \hat{U}(t, t_0) |\psi(t_0)\rangle \quad (267)$$

U unitär

Von-Neumann Gleichung

Zeitentwicklung des
Dichteoperators im
Schrödingerbild. Qm.
Analogon zur
Liouville-Gleichung ??

$$\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \hat{\rho}] \quad (268)$$

Lindblad-Mastergleichung
Verallgemeinerung der
von-Neumann Gleichung für
offene Quantensysteme

$$\dot{\rho} = \underbrace{-\frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \rho]}_{\text{reversible}} + \underbrace{\sum_{n,m} h_{nm} \left(\hat{A}_n \rho \hat{A}_m^\dagger - \frac{1}{2} \{ \hat{A}_m^\dagger \hat{A}_n, \rho \} \right)}_{\text{irreversible}} \quad (269)$$

h positiv-semifinite Matrix, \hat{A} beliebiger Operator

Hellmann-Feynman-Theorem
Ableitung der Energie nach
einem Parameter

$$\frac{dE_\lambda}{d\lambda} = \int d^3r \psi_\lambda^* \frac{d\hat{H}_\lambda}{d\lambda} \psi_\lambda = \left\langle \psi(\lambda) \left| \frac{d\hat{H}_\lambda}{d\lambda} \right| \psi(\lambda) \right\rangle \quad (270)$$

TODO: unitary transformation of time dependent H

21.1.1 Schrödinger- und Heisenberg-Bild

Im Schrödinger-Bild sind die Zustände zeitabhängig, im Heisenberg-Bild sind die Observablen (Operatoren) zeitabhängig

Schrödinger Zeitentwicklung

$$|\psi(t)_S\rangle = \hat{U}(t, t_0) |\psi(t_0)\rangle \quad (271)$$

Heisenberg Zeitentwicklung

$$|\psi_H\rangle = |\psi_S(t_0)\rangle \quad (272)$$

$$A_H = U^\dagger(t, t_0) A_S U(t, t_0) \quad (273)$$

$$\frac{d\hat{A}_H}{dt} = \frac{1}{i\hbar} [\hat{A}_H, \hat{H}_H] + \left(\frac{\partial \hat{A}_S}{\partial t} \right)_H \quad (274)$$

mit H und S dem Heisenberg- und Schrödinger-Bild

21.1.2 Ehrenfest-Theorem

Siehe auch ??

Ehrenfest-Theorem
gilt für beide Bilder

$$\frac{d}{dt} \langle \hat{A} \rangle = \frac{1}{i\hbar} \langle [\hat{A}, \hat{H}] \rangle + \left\langle \frac{\partial \hat{A}}{\partial t} \right\rangle \quad (275)$$

Ehrenfest-Theorem Beispiel
Beispiel für x

$$m \frac{d^2}{dt^2} \langle x \rangle = - \langle \nabla V(x) \rangle = \langle F(x) \rangle \quad (276)$$

21.2 Korrespondenzprinzip

Die klassischen Bewegungsgleichungen lassen sich als Grenzfall (große Quantenzahlen) aus der Quantenmechanik ableiten.

22 Störungstheorie

qm:qm_pertubation:desc

Hamiltonian

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \lambda \hat{H}_1 \quad (277)$$

Potenzreihe

$$E_n = E_n^{(0)} + \lambda E_n^{(1)} + \lambda^2 E_n^{(2)} + \dots \quad (278)$$

$$|\psi_n\rangle = |\psi_n^{(0)}\rangle + \lambda |\psi_n^{(1)}\rangle + \lambda^2 |\psi_n^{(2)}\rangle + \dots \quad (279)$$

Energieverschiebung 1. Ordnung

$$E_n^{(1)} = \langle \psi_n^{(0)} | \hat{H}_1 | \psi_n^{(0)} \rangle \quad (280)$$

Zustände

$$|\psi_n^{(1)}\rangle = \sum_{k \neq n} \frac{\langle \psi_k^{(0)} | \hat{H}_1 | \psi_n^{(0)} \rangle}{E_n^{(0)} - E_k^{(0)}} |\psi_k^{(0)}\rangle \quad (281)$$

Energieverschiebung 2. Ordnung

$$E_n^{(2)} = \sum_{k \neq n} \frac{|\langle \psi_k^{(0)} | \hat{H}_1 | \psi_n^{(0)} \rangle|^2}{E_n^{(0)} - E_k^{(0)}} \quad (282)$$

Fermis goldene Regel
Übergangsrate des initial
Zustandes $|i\rangle$ unter einer
Störung H^1 zum Endzustand
 $|f\rangle$

$$\Gamma_{i \rightarrow f} = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle f | H^1 | i \rangle|^2 \rho(E_f) \quad (283)$$

23 Harmonischer Oszillator

Hamiltonian

$$H = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 \quad (284)$$

$$= \frac{1}{2} \hbar \omega + \omega a^\dagger a \quad (285)$$

Energiespektrum

$$E_n = \hbar \omega \left(\frac{1}{2} + n \right) \quad (286)$$

Siehe auch ??

23.1 Erzeugung und Vernichtungsoperatoren / Leiteroperatoren

Teilchenzahloperator/Besetzungszahloperator

$$\hat{N} := a^\dagger a \quad (287)$$

$$\hat{N} |n\rangle = n |N\rangle \quad (288)$$

$|n\rangle =$ Fock-Zustände, $\hat{a} =$ Vernichtungsoperator, $\hat{a}^\dagger =$ Erzeugungsoperator

Kommutator

$$[\hat{a}, \hat{a}^\dagger] = 1 \quad (289)$$

$$[N, \hat{a}] = -\hat{a} \quad (290)$$

$$[N, \hat{a}^\dagger] = \hat{a}^\dagger \quad (291)$$

Anwendung auf Zustände

$$\hat{a} |n\rangle = \sqrt{n} |n-1\rangle \quad (292)$$

$$\hat{a}^\dagger |n\rangle = \sqrt{n+1} |n+1\rangle \quad (293)$$

$$|n\rangle = \frac{1}{\sqrt{n!}} (\hat{a}^\dagger)^n |0\rangle \quad (294)$$

Matrix-Form

$$\hat{n} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N \end{pmatrix} \quad (295)$$

$$\hat{a} = \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{N} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (296)$$

$$\hat{a}^\dagger = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sqrt{1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{N} & 0 \end{pmatrix} \quad (297)$$

23.1.1 Harmonic Oscillator

Harmonischer Oszillator

$$\hat{x} = \sqrt{\frac{\hbar}{2m\omega}} (\hat{a} + \hat{a}^\dagger) \quad (298)$$

$$\hat{p} = -i\sqrt{\frac{m\omega\hbar}{2}} (\hat{a} - \hat{a}^\dagger) \quad (299)$$

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + \frac{m\omega^2 \hat{x}^2}{2} = \hbar\omega \left(a^\dagger a + \frac{1}{2} \right) \quad (300)$$

$$a = \frac{1}{\sqrt{2}} (\tilde{X} + i\tilde{P}) \quad (301)$$

$$a^\dagger = \frac{1}{\sqrt{2}} (\tilde{X} - i\tilde{P}) \quad (302)$$

24 Drehmoment

24.1 Aharonov-Bohm Effekt

Erhaltene Phase
Elektron entlang eines
geschlossenen Phase erhält
eine Phase die proportional
zum eingeschlossenen
magnetischem Fluss ist

$$\delta = \frac{2e}{\hbar} \oint \vec{A} \cdot d\vec{s} = \frac{2e}{\hbar} \Phi \quad (303)$$

TODO:replace with loop intergral symbol and add more info

25 Periodische Potentiale

Blochwellen
Lösen stat. SG im
periodischen Potential mit
Periode \vec{R} : $V(\vec{r}) = V(\vec{r} + \vec{R})$

$$\psi_{\vec{k}}(\vec{r}) = e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}} \cdot u_{\vec{k}}(\vec{r}) \quad (304)$$

\vec{k} beliebig, u periodische Funktion

Periodizität

$$u_{\vec{k}}(\vec{r} + \vec{R}) = u_{\vec{k}}(\vec{r}) \quad (305)$$

$$\psi_{\vec{k} + \vec{G}}(\vec{r}) = \psi_{\vec{k}}(\vec{r}) \quad (306)$$

\vec{R} Gittervektor, \vec{G} Reziproker Gittervektor

26 Symmetrien

Die meisten Symmetrieoperatoren sind unitär ??, da die Norm eines Zustands invariant unter Raum-, Zeit- und Spin-Transformationen sein muss.

Invarianz

\hat{H} is invariant unter der von
 \hat{U} beschriebenen Symmetrie
wenn gilt:

$$\hat{U} \hat{H} \hat{U}^\dagger = \hat{H} \Leftrightarrow [\hat{U}, \hat{H}] = 0 \quad (307)$$

26.1 Zeitumkehrungssymmetrie

Zeitumkehrungssymmetrie

$$T : t \rightarrow -t \quad (308)$$

Antiunitär

$$T^2 = -1 \quad (309)$$

27 Zwei-Niveau System (TLS)

James-Cummings
Hamiltonian
TLS interagiert mit
resonantem Lichtfeld

$$H = \underbrace{\hbar\omega_c \hat{a}^\dagger \hat{a}}_{\text{field}} + \underbrace{\hbar\omega_a \frac{\hat{\sigma}_z}{2}}_{\text{atom}} + \underbrace{\frac{\hbar\Omega}{2} \hat{E} \hat{S}}_{\text{int}} \quad (310)$$

after RWA:

$$= \hbar\omega_c \hat{a}^\dagger \hat{a} + \hbar\omega_a \hat{\sigma}^\dagger \hat{\sigma} + \frac{\hbar\Omega}{2} (\hat{a} \hat{\sigma}^\dagger + \hat{a}^\dagger \hat{\sigma}) \quad (311)$$

$$= \hbar\omega_c \hat{a}^\dagger \hat{a} + \hbar\omega_a \hat{\sigma}^\dagger \hat{\sigma} + \frac{\hbar\Omega}{2} (\hat{a} \hat{\sigma}^\dagger + \hat{a}^\dagger \hat{\sigma}) \quad (312)$$

$\hat{E} = E_{\text{ZPF}}(\hat{a} + \hat{a}^\dagger)$ Feldoperator mit bosonischen Leiteroperatoren, $\hat{S} = \hat{\sigma}^\dagger + \hat{\sigma}$ Polarisationsoperator mit Leiteroperatoren des TLS

28 Sonstiges

Rotating Wave
Approximation /
Drehwellennäherung (RWS)
Schnell oscillierende Terme
werden vernachlässigt

$$\Delta\omega := |\omega_0 - \omega_L| \ll |\omega_0 + \omega_L| \approx 2\omega_0 \quad (313)$$

ω_L Frequenz des Lichtes, ω_0 Übergangsfrequenz

Slater Determinante
Konstruktion einer
fermionischen
(antisymmetrischen)
Vielteilchen Wellenfunktion
aus ein-Teilchen
Wellenfunktionen

$$\Psi(q_1, \dots, q_N) = \frac{1}{\sqrt{N!}} \begin{vmatrix} \phi_a(q_1) & \phi_a(q_2) & \dots & \phi_a(q_N) \\ \phi_b(q_1) & \phi_b(q_2) & \dots & \phi_b(q_N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_z(q_1) & \phi_z(q_2) & \dots & \phi_z(q_N) \end{vmatrix} \quad (314)$$

29 Wasserstoffatom

Reduzierte Masse

$$\mu = \frac{m_e m_K}{m_e + m_K} \stackrel{m_e \ll m_K}{\approx} m_e \quad (315)$$

Coulomb potential
Für ein Eielektronenatom

$$V(\vec{r}) = \frac{Z e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (316)$$

Z Ordnungszahl/Kernladungszahl

Hamiltonian

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla_{\vec{r}}^2 - V(\vec{r}) \quad (317)$$

$$= \frac{\hat{p}_r^2}{2\mu} + \frac{\hat{L}^2}{2\mu r} + V(r) \quad (318)$$

Wellenfunktion

$$\psi_{nlm}(r, \theta, \phi) = R_{nl}(r) Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (319)$$

$R_{nl}(r)$ Radialanteil, Y_{lm} qm:spherical_harmonics

Radialanteil	$R_{nl} = -\sqrt{\frac{(n-l-1)!(2\kappa)^3}{2n[(n+l)!]^3}} (2\kappa r)^l e^{-\kappa r} L_{n+1}^{2l+1}(2\kappa r) \quad (320)$ <p>with</p> $\kappa = \frac{\sqrt{2\mu E }}{\hbar} = \frac{Z}{na_B} \quad (321)$ <p>$L_r^s(x)$ Laguerre-Polynome</p>
Energieeigenwerte	$E_n = \frac{Z^2 \mu e^4}{n^2 (4\pi\epsilon_0)^2 2\hbar^2} = -E_H \frac{Z^2}{n^2} \quad (322)$
Rydberg-Energy	$E_H = h c R_H = \frac{\mu e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 2\hbar^2} \quad (323)$

29.1 Korrekturen

29.1.1 Darwin-Term

Relativistische Korrektur: Elektronen führen eine Zitterbewegung aus und sind nicht vollständig lokalisiert.

Energieverschiebung	$\Delta E_{\text{rel}} = -E_n \frac{Z^2 \alpha^2}{n} \left(\frac{3}{4n} - \frac{1}{l + \frac{1}{2}} \right) \quad (324)$
Feinstrukturkonstante Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137} \quad (325)$

29.1.2 Spin-Bahn-Kopplung (LS-Kopplung)

Die Wechselwirkung zwischen dem Elektronenspin und dem elektrostatischen Feld des Kerns führt zu Energieverschiebungen.

Energieverschiebung	$\Delta E_{\text{LS}} = \frac{\mu_0 Z e^2}{8\pi m_e^2 r^3} \langle \vec{S} \cdot \vec{L} \rangle \quad (326)$
??	$\begin{aligned} \langle \vec{S} \cdot \vec{L} \rangle &= \frac{1}{2} \langle [J^2 - L^2 - S^2] \rangle \\ &= \frac{\hbar^2}{2} [j(j+1) - l(l+1) - s(s+1)] \end{aligned} \quad (327)$

29.1.3 Feinstruktur

Die Feinstruktur vereint relativistische Korrekturen 29.1.1 und die Spin-Orbit-Kopplung 29.1.2.

Energieverschiebung	$\Delta E_{\text{FS}} = \frac{Z^2 \alpha^2}{n} \left(\frac{1}{j + \frac{1}{2}} - \frac{3}{4n} \right) \quad (328)$
---------------------	---

29.1.4 Lamb-Shift

The Wechselwirkung zwischen dem Elektron und vom Kern absorbierten/emittierten virtuellen Photonen führt zu einer (sehr kleinen) Energieverschiebung.

Potentielle Energy

$$\langle E_{\text{pot}} \rangle = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \left\langle \frac{1}{r + \delta r} \right\rangle \quad (329)$$

δr Schwankung von r

29.1.5 Hyperfeinstruktur

Wechselwirkung von Kernspin mit dem vom Elektron erzeugten Magnetfeld spaltet Energieniveaus

Kernspin

$$\vec{F} = \vec{J} + \vec{I} \quad (330)$$

$$|\vec{I}| = \sqrt{i(i+1)}\hbar \quad (331)$$

$$I_z = m_i\hbar \quad (332)$$

$$m_i = -i, -i+1, \dots, i-1, i \quad (333)$$

Gesamtdrehimpuls

$$\vec{F} = \vec{J} + \vec{I} \quad (334)$$

$$|\vec{F}| = \sqrt{f(f+1)}\hbar \quad (335)$$

$$F_z = m_f\hbar \quad (336)$$

Auswahlregel

$$f = j \pm i \quad (337)$$

$$m_f = -f, -f+1, \dots, f-1, f \quad (338)$$

Hyperfeinstrukturkonstante

$$A = \frac{g_i\mu_K B_{\text{HFS}}}{\sqrt{j(j+1)}} \quad (339)$$

B_{HFS} Hyperfeinfeld, μ_K Kernmagneton, g_i Kern-g-Faktor ??

Energieverschiebung

$$\Delta H_{\text{HFS}} = \frac{A}{2} [f(f+1) - j(j+1) - i(i+1)] \quad (340)$$

TODO:landé factor

29.2 Effekte im Magnetfeld

TODO:all

TODO:Hunds rules

29.3 Sonstiges

Auger-Meitner-Effekt

Auger-Effekt

Ein angeregtes Elektron fällt in ein unbesetztes, niedrigeres Energieniveau zurück. Durch die frei werdende Energie verlässt ein Elektron aus einer höheren Schale das Atom (Auger-Elektron).

Teil VII

Festkörperphysik

TODO: Bonds, hybridized orbitals

30 Kristalle

30.1 Bravais-Gitter

Tabelle 2: In 2D gibt es 5 verschiedene Bravais-Gitter

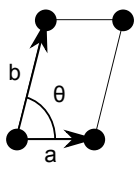
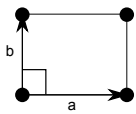
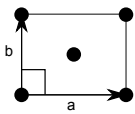
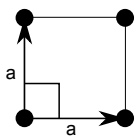
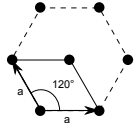
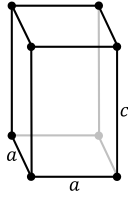
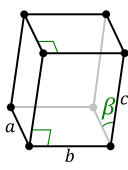
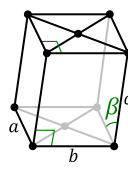
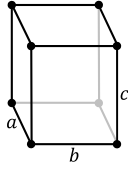
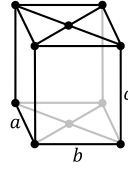
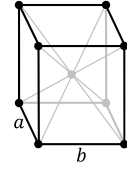
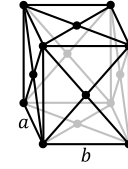
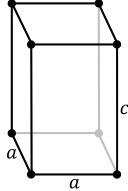
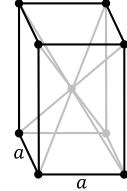
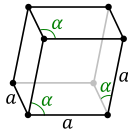
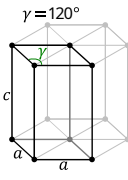
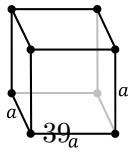
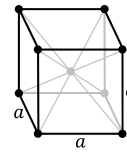
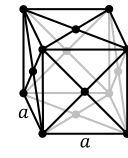
Gittersystem	Punktgruppe	5 Bravais Gitter	
		primitive (p)	centered (c)
monoclinic (m)	C_2		
orthorhombic (o)	D_2		
tetragonal (t)	D_4		
hexagonal (h)	D_6		

Tabelle 3: In 3D gibt es 14 verschiedene Bravais-Gitter

Kristall-system	Gittersystem	Punktgruppe	14 Bravais Gitter			
			primitive (P)	base_centered (S)	body_centered (I)	face_centered (F)
triclinic (a)		C_i				
monoclinic (m)		C_{2h}				
orthorhombic (o)		D_{2h}				
tetragonal (t)		D_{4h}				
hexagonal (h)	rhombohedral	D_{3d}				
	hexagonal	D_{6h}				
cubic (c)		O_h				

Gitterkonstante
Parameter (Länge oder Winkel) der die Einheitszelle beschreibt

Symbol: a
Unit:

Gittervektor

Symbol: \vec{R}
Unit:

$$\vec{R} = n_1 \vec{a}_1 + n_2 \vec{a}_2 + n_3 \vec{a}_3 \quad (341)$$

$n_i \in \mathbb{Z}$

TODO: primitive unit cell: contains one lattice point

Millersche Indizes

$$(hkl)\text{plane} \quad (342)$$

$$[hkl]\text{direction} \quad (343)$$

$$\{hkl\}\text{millerFamily} \quad (344)$$

Miller family: planes that are equivalent due to crystal symmetry

30.2 Reziprokes Gitter

Das rezioproke Gitter besteht aus dem dem Satz aller Wellenvektoren \vec{k} , die ebene Wellen mit der Periodizität des Bravais-Gitters ergeben.

Reziproke Gittervektoren

$$\vec{b}_1 = \frac{2\pi}{V_c} \vec{a}_2 \times \vec{a}_3 \quad (345)$$

$$\vec{b}_2 = \frac{2\pi}{V_c} \vec{a}_3 \times \vec{a}_1 \quad (346)$$

$$\vec{b}_3 = \frac{2\pi}{V_c} \vec{a}_1 \times \vec{a}_2 \quad (347)$$

a_i Bravais-Gitter Vektoren, V_c Volumen der primitiven Gitterzelle

Reziproker Gittervektor

Symbol: \vec{G}
Unit:

$$\vec{G}_{hkl} = h\vec{b}_1 + k\vec{b}_2 + l\vec{b}_3 \quad (348)$$

$n_i \in \mathbb{Z}$

30.3 Streuprozesse

Matthiessensche Regel
Näherung, nur gültig wenn die einzelnen Streuprozesse von einander unabhängig sind

$$\frac{1}{\mu} = \sum_{i=\text{Streuprozesse}} \frac{1}{\mu_i} \quad (349)$$

$$\frac{1}{\tau} = \sum_{i=\text{Streuprozesse}} \frac{1}{\tau_i} \quad (350)$$

μ Elektrische Mobilität / Beweglichkeit, τ Streuzeit

30.4 Gitter

Einfach kubisch (SC)
 Reziprok: Einfach kubisch

$$\vec{a}_1 = a \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{a}_2 = a \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{a}_3 = a \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (351)$$

a Gitterkonstante

Kubisch raumzentriert (BCC)
 Reziprok: cm:bravais:fcc

$$\vec{a}_1 = \frac{a}{2} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{a}_2 = \frac{a}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{a}_3 = \frac{a}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (352)$$

a Gitterkonstante

Kubisch flächenzentriert (FCC)
 Reziprok: cm:bravais:bcc

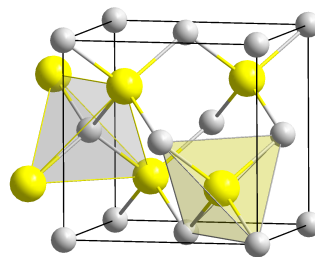
$$\vec{a}_1 = \frac{a}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{a}_2 = \frac{a}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{a}_3 = \frac{a}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (353)$$

a Gitterkonstante

Diamantstruktur

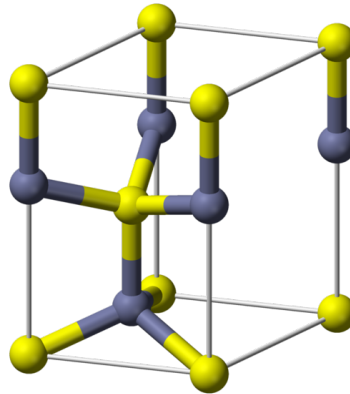
cm:bravais:fcc mit Basis $(0 \ 0 \ 0)$ und $(\frac{1}{4} \ \frac{1}{4} \ \frac{1}{4})$

Zinkblende-Struktur



Wie
 cm:bravais:diamond aber mit unterschiedlichen Spezies auf
 den Basen

Wurtzite-Struktur
 hP4



Placeholder cm:cry-
 stal:lat:wurtzite:desc

31 Freies Elektronengase

Annahmen: Elektronen bewegen sich frei und unabhängig voneinander.

Driftgeschwindigkeit
Geschwindigkeitskomponente
durch eine externe Kraft (z.B.
ein elektrisches Feld)

$$\vec{v}_D = \vec{v} - \vec{v}_{th} \quad (354)$$

v_{th} thermische Geschwindigkeit

Mittlere freie Weglänge

$$\ell = \langle v \rangle \tau \quad (355)$$

Elektrische Mobilität /
Beweglichkeit
Leichtigkeit mit der sich
durch ein Elektrisches Feld
beeinflusstes Teilchen im
Material bewegt

Symbol: μ
Unit: $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

$$\mu = \frac{q\tau}{m} \quad (356)$$

q Ladung, m Masse, τ Streuzeit

31.1 2D Elektronengas

Niederdimensionale Elektronengase erhält man, wenn ein 3D Gas durch unendlich hohe Potentialwände auf einem schmalen Bereich mit Breite L eingeschränkt wird.

Confinement Energie
Erhöht die
Grundzustandsenergie

$$\Delta E = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_e L^2} \quad (357)$$

Energie

$$E_n = \underbrace{\frac{\hbar^2 k_{\parallel}^2}{2m_e}}_{x-y: \text{ ebene Welle}} + \underbrace{\frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_e L^2} n^2}_z \quad (358)$$

31.2 1D Elektronengas / Quantendraht

Energie

$$E_n = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m_e} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_e L_z^2} n_1^2 + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_e L_y^2} n_2^2 \quad (359)$$

TODO:conductance

31.3 0D Elektronengase / Quantenpunkt

TODO:TODO

32 Ladungstransport

32.1 Drude-Modell

Ein klassisches Model zur Beschreibung der Transporteigenschaften von Elektronen in (v.a.) Metallen: Der Festkörper wird als Ionenkristall mit frei beweglichen Elektronen (Elektronengas). Die Elektronen werden durch ein Elektrisches Feld E beschleunigt und durch Stöße mit den Gitterionen gebremst. Das Modell vernachlässigt die Fermi-Dirac Verteilung der Leitungselektronen.

Bewegungsgleichung

$$m_e \frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{m_e}{\tau} \vec{v}_D = -e\vec{E} \quad (360)$$

v Elektronengeschwindigkeit, \vec{v}_D Driftgeschwindigkeit, τ Stoßzeit

Streuzeit Momentum relaxation time	Symbol: τ Unit: 1 s
	τ the average time between scattering events weighted by the characteristic momentum change cause by the scattering process.

Stromdichte Ohmsches Gesetz	Symbol: \vec{j} Unit: 1 A/m ²
	$\vec{j} = -ne\vec{v}_D = ne\mu\vec{\mathcal{E}}$ (361)
n Ladungsträgerdichte	

Drude-Leitfähigkeit	$\sigma = \frac{\vec{j}}{\vec{\mathcal{E}}} = \frac{e^2\tau n}{m_e} = ne\mu$ (362)
---------------------	--

32.2 Sommerfeld-Modell

Annahme eines freien Fermionengases, welches dem Pauli-Prinzip unterliegt. Nur Elektronen in einem Energiebereich von $k_B T$ um die Fermi Energie E_F nehmen an Streuprozessen teil.

Elektrische Stromdichte	$\vec{j} = -en \langle v \rangle = -en \frac{\hbar}{m_e} \langle \vec{k} \rangle = -e \frac{1}{V} \sum_{\vec{k}, \sigma} \frac{\hbar \vec{k}}{m_e}$ (363)
-------------------------	---

TODO: The formula for the conductivity is the same as in the drude model?

32.3 Boltzmann-Transport

Semiklassische Beschreibung, benutzt eine Wahrscheinlichkeitsverteilung (stat:todo:fermi_dirac).

Boltzmann- Transportgleichung für Ladungstransport	$\frac{\partial f(\vec{r}, \vec{k}, t)}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \vec{\nabla}_{\vec{r}} f - \frac{e}{\hbar} (\vec{\mathcal{E}} + \vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{\nabla}_{\vec{k}} f + \left(\frac{\partial f(\vec{r}, \vec{k}, t)}{\partial t} \right)_{\text{scatter}}$ (364)
	f ??

32.4 misc

Tsu-Esaki Tunnelstrom Beschreibt den Strom $I_{L \leftrightarrow R}$ durch eine Barriere	$I_T = \frac{2e}{h} \int_{U_L}^{\infty} (f(E, \mu_L) - f(E, \mu_R)) T(E) dE$ (365)
	μ_i ??? : chemical_pot links/rechts, U_i Spannung links/rechts. Elektronen besetzen Bereich zwischen U_i und μ_i

Kontinuitätsgleichung der Ladung Elektrische Ladung kann sich nur durch die Stärke des Stromes ändern	$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{j}$ (366)
	ρ Ladungsdichte, \vec{j} Stromdichte

33 Supraleitung

Materialien, bei denen der elektrische Widerstand beim unterschreiten einer kritischen Temperatur T_c auf 0 springt. Sie verhalten sich dann wie ideale Leiter und ideale Diamagnete, bis zu einem kritischen Feld B_c .

Ideale Leiter

Im Gegensatz zu einem Supraleiter werden ideale Leiter nur dann diamagnetisch, wenn das externe magnetische Feld **nach** dem Abkühlen unter die kritische Temperatur eingeschaltet wird. (ed:fields:mag:induction:lenz)

Meißner-Ochsenfeld Effekt
Idealer Diamagnetismus

Externes Magnetfeld fällt im Supraleiter exponentiell unterhalb einer kritischen Temperatur und unterhalb einer kritischen Feldstärke ab.

33.1 London-Gleichungen

Quantitative Beschreibung des **Meißner-Ochsenfeld Effekts**.

Erste London-Gleichung

$$\frac{\partial \vec{j}_s}{\partial t} = \frac{n_s q_s^2}{m_s} \vec{E} - \mathcal{O}(j_s^2) \quad (367)$$

\vec{j} Stromdichte, n_s , m_s , q_s Dichte, Masse und Ladung der supraleitenden Teilchen

Zweite London-Gleichung
Beschreibt den
Meißner-Ochsenfeld Effekt

$$\vec{\nabla} \times \vec{j}_s = -\frac{n_s q_s^2}{m_s} \vec{B} \quad (368)$$

\vec{j} Stromdichte, n_s , m_s , q_s Dichte, Masse und Ladung der supraleitenden Teilchen

London Eindringtiefe

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{m_s}{\mu_0 n_s q_s^2}} \quad (369)$$

33.2 Ginzburg-Landau Theorie (GLAG)

Ginzburg-Landau
Kohärenzlänge

$$\xi_{GL} = \frac{\hbar}{\sqrt{2m}|\alpha|} \quad (370)$$

$$\xi_{GL}(T) = \xi_{GL}(0) \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{T}{T_c}}} \quad (371)$$

Ginzburg-Landau
Eindringtiefe

$$\lambda_{GL} = \sqrt{\frac{m_s \beta}{\mu_0 |\alpha| q_s^2}} \quad (372)$$

$$\lambda_{GL}(T) = \lambda_{GL}(0) \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{T}{T_c}}} \quad (373)$$

Erste Ginzburg-Landau
Gleichung

$$\alpha \Psi + \beta |\Psi|^2 \Psi + \frac{1}{2m} (-i\hbar \vec{\nabla} + 2e\vec{A})^2 \Psi = 0 \quad (374)$$

ξ_{GL} Ginzburg-Landau Kohärenzlänge, λ_{GL} Ginzburg-Landau Eindringtiefe

Zweite Ginzburg-Landau Gleichung

$$\vec{j}_s = \frac{ie\hbar}{m} (\Psi^* \vec{\nabla} \Psi - \Psi \vec{\nabla} \Psi^*) - \frac{4e^2}{m} |\Psi|^2 \vec{A} \quad (375)$$

TODO:proximity effect

33.3 Mikroskopische Theorie

33.4 BCS-Theorie

34 Halbleiter

Intrinsisch/Extrinsisch

Intrinsisch: Pur, Elektronendichte gegeben durch thermische Anregung und $n_i^2 = n_0 p_0$
 Extrinsisch: gedoped
 n, p Ladungsträgerdichte im Equilibrium

Ladungsträgerdichte im Equilibrium
 Gilt wenn $\frac{E_c - E_F}{k_B T} > 3.6$ und $\frac{E_F - E_v}{k_B T} > 3.6$

$$n_0 \approx N_c(T) \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_B T}\right) \quad (376)$$

$$p_0 \approx N_v(T) \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{k_B T}\right) \quad (377)$$

Intrinsische Ladungsträgerdichte

$$n_i \approx \sqrt{n_0 p_0} = \sqrt{N_c(T) N_v(T)} \exp\left(-\frac{E_{\text{gap}}}{2k_B T}\right) \quad (378)$$

Massenwirkungsgesetz
 Ladungsträgerdichten im Equilibrium, unabhängig der Dotierung

$$np = n_i^2 \quad (379)$$

	$E_{\text{gap}}(0\text{ K})[\text{eV}]$	$E_{\text{gap}}(300\text{ K})[\text{eV}]$	
Diamant	5,48	5,47	indirect
Si	1,17	1,12	indirect
Ge	0,75	0,66	indirect
GaP	2,32	2,26	indirect
GaAs	1,52	1,43	direct
InSb	0,24	0,18	direct
InP	1,42	1,35	direct
CdS	2,58	2,42	direct

Minoritäts- / Majoritätsladungstraäger

Majoritätsladungstraäger: höhere Teilchenzahl (e^- in n-Typ, h^+ in p-Typ)
 Minoritätsladungstraäger: niedrigere Teilchenzahl (h^+ in n-Typ, e^- in p-Typ)

35 Bändermodell

35.1 Hybridorbitale

Hybridorbitale werden durch Linearkombinationen von anderen atomorbitalen gebildet.

sp³ Orbital
eg CH₄

$$1s + 3p = sp^3$$



(380)

sp² Orbital

$$1s + 2p = sp^2$$



(381)

sp Orbital

$$1s + 1p = sp$$



(382)

36 Diffusion

Diffusionskoeffizient

Symbol: D
Unit: $1 \text{ m}^2/\text{s}$

Teilchenstromdichte
Anzahl der Teilchen durch
eine Fläche

Symbol: J
Unit: $1 1/\text{s}^2$

Einsteinrelation
Klassisch

$$D = \frac{\mu k_B T}{q} \quad (383)$$

D Diffusionskoeffizient, μ Elektrische Mobilität / Beweglichkeit, T Temperatur, q Ladung

Konzentration
Eine Größe pro Volumen

Symbol: c
Unit: $1 \text{ x}/\text{m}^3$

Erstes Ficksches Gesetz
Teilchenbewegung ist
proportional zum
Konzentrationsgradienten

$$J = -D \frac{c}{x} \quad (384)$$

J Teilchenstromdichte, D Diffusionskoeffizient, c Konzentration

Zweites Ficksches Gesetz

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (385)$$

J Teilchenstromdichte, D Diffusionskoeffizient, c Konzentration

37 misc

Exziton

Quasiteilchen, Anregung im Festkörper als gebundenes Elektron-Loch-Paar

Austrittsarbeit
eng. "Work function";
minimale Energie um ein
Elektron aus dem Festkörper
zu lösen

Symbol: W
Unit: 1 eV

$$-e\phi - E_F \quad (386)$$

38 Messtechniken

38.1 ARPES

what? in? how? plot

38.2 Rastersondenmikroskopie (SPM)

Bilder der Oberfläche einer Probe werden erstellt, indem die Probe mit einer Sonde abgetastet wird.

Name	<code>\fqname :amf:name</code>
Anwendung	<code>\fqname :amf:application</code>
how	<code>\fqname :amf:how</code>

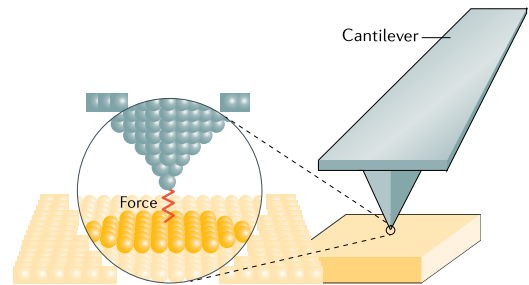


Abbildung 1: [?]

Name	<code>\fqname :stm:name</code>
Anwendung	<code>\fqname :stm:application</code>
how	<code>\fqname :stm:how</code>

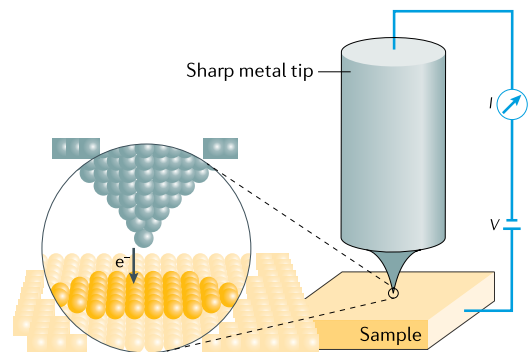
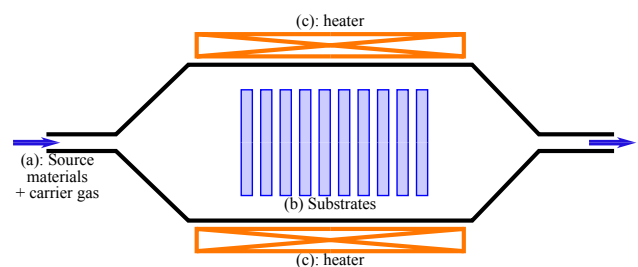


Abbildung 2: [?]

39 Herstellungsmethoden

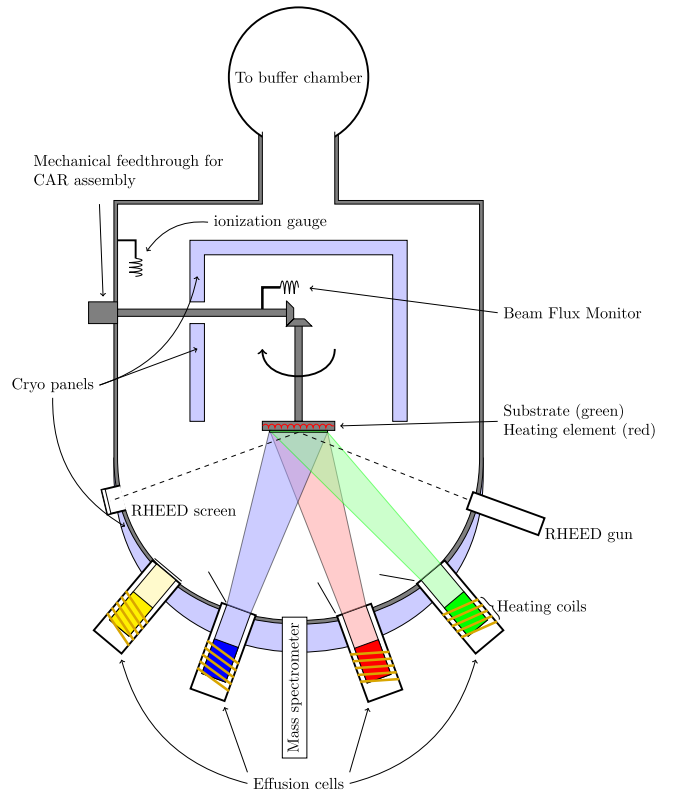
Name	<code>\fqname :cvd:name</code>
how	<code>\fqname :cvd:how</code>
Anwendung	<code>\fqname :cvd:application</code>



39.1 Epitaxie

Eine Art des Kristallwachstums, bei der mindestens eine kristallographische Ordnung der wachsenden Schicht der des Substrates entspricht.

Name	\fqname :mbe:name
how	\fqname :mbe:how
Anwendung	\fqname :mbe:application



Teil VIII

Topologische Materialien

40 Berry-Phase / Geometrische Phase

Beim adiabatischem Durchlauf eines geschlossenen Weges durch den Parameterraum $R(t)$ kann die Wellenfunktion eines Systems eine zusätzliche Phase γ erhalten.

Wenn $\vec{R}(t)$ adiabatisch (langsam) variiert und das System anfangs im Eigenzustand $|n\rangle$ ist, bleibt das System während dem Prozess in einem Eigenzustand (Adiabatisches Theorem der Quantenmechanik).

Schrödinger Gleichung

$$H(\vec{R}(t)) |n(\vec{R}(t))\rangle = \epsilon(\vec{R}(t)) |n(\vec{R}(t))\rangle \quad (387)$$

Wellenfunktion
Nach vollem adiabtischem
Umlauf in \vec{R}

$$|\psi_n(t)\rangle = \underbrace{e^{i\gamma_n(t)}}_{\text{Berry Phase}} \underbrace{e^{-\frac{i}{\hbar} \int^t \epsilon_n(\vec{R}(t')) dt}}_{\text{Dynamische Phase}} |n(\vec{R}(t))\rangle \quad (388)$$

Berry connection

$$A_n(\vec{R}) = i \langle \psi | \nabla_R | \psi \rangle \quad (389)$$

Berry-Krümmung
Eichinvariant

$$\vec{\Omega}_n = \vec{\nabla}_R \times A_n(\vec{R}) \quad (390)$$

Berry-Phase
Eichinvariant bis auf 2π

$$\gamma_n = \oint_C d\vec{R} \cdot A_n(\vec{R}) = \int_S d\vec{S} \cdot \vec{\Omega}_n(\vec{R}) \quad (391)$$

Der Berry-Fluß durch eine geschlossene 2D Fläche ist quantisiert durch die **Chernzahl**. Bei erhaltener Zeitumkehrungssymmetrie ist die Chernzahl 0.

Chernzahl

Der Berry-Fluß durch eine geschlossene 2D Fläche ist quantisiert durch die **Chernzahl**. Bei erhaltener Zeitumkehrungssymmetrie ist die Chernzahl 0.

$$C_n = \frac{1}{2\pi} \oint d\vec{S} \cdot \vec{\Omega}_n(\vec{R}) \quad (392)$$

\vec{S} geschlossene Fläche im \vec{R} -Raum

Hall-Leitfähigkeit eines 2D
Band-Isolators

$$\bar{\sigma}_{xy} = \sum_n \frac{e^2}{h} \int_{\text{occupied}} d^2k \frac{\Omega_{xy}^n}{2\pi} = \sum_n C_n \frac{e^2}{h} \quad (393)$$

Beim adiabatischem Durchlauf eines geschlossenen Weges durch den Parameterraum $R(t)$ kann die Wellenfunktion eines Systems eine zusätzliche Phase γ erhalten.

Wenn $\vec{R}(t)$ adiabatisch (langsam) variiert und das System anfangs im Eigenzustand $|n\rangle$ ist, bleibt das System während dem Prozess in einem Eigenzustand (Adiabatisches Theorem der Quantenmechanik).

Teil IX

Quantencomputing

41 Qubits

Bloch-Sphäre

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle \quad (394)$$

$$= \cos \frac{\theta}{2} e^{i\phi_\alpha} |0\rangle + \sin \frac{\theta}{2} e^{i\phi_\beta} |1\rangle \quad (395)$$

$$= e^{i\phi_\alpha} \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + \sin \frac{\theta}{2} e^{i\phi} |1\rangle \quad (396)$$

42 Gates

\fqqname :gates

$$TODO : remove macro2 \quad (397)$$

43 Supraleitende qubits

43.1 Bauelemente

43.1.1 Josephson-Kontakt

Wenn zwei Supraleiter durch einen dünnen Isolator getrennt sind, können Cooper-Paare durch den Isolator tunneln. Der Josephson-Kontakt ist ein nicht-linearer Induktor.

Josephson-Hamiltonian

$$\hat{H}_J = -\frac{E_J}{2} \sum_n [|n\rangle \langle n+1| + |n+1\rangle \langle n|] \quad (398)$$

1. Josephson Gleichung
Dissipationsloser Suprastrom durch die Kreuzung ohne angelegte Spannung

$$\hat{I} |\delta\rangle = I_C \sin \delta |\delta\rangle \quad (399)$$

$I_C = \frac{2e}{\hbar} E_J$ kritischer Strom, δ Phasendifferenz zwischen den Supraleitern

2. Josephson Gleichung
Supraleitende Phasendifferenz is proportional zur angelegten Spannung

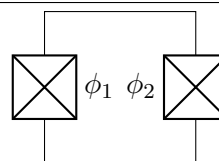
$$\frac{d\hat{\delta}}{dt} = \frac{1}{i\hbar} [\hat{H}, \hat{\delta}] = -\frac{2eU}{i\hbar} [\hat{n}, \hat{\delta}] = \frac{1}{\varphi_0} U \quad (400)$$

$\varphi_0 = \frac{\hbar}{2e}$ reduziertes Flussquantum

43.1.2 SQUID

SQUID

Superconducting quantum interference device, besteht aus parallelen Induktoren und kann zur Messung extrem schwacher Magnetfelder genutzt werden

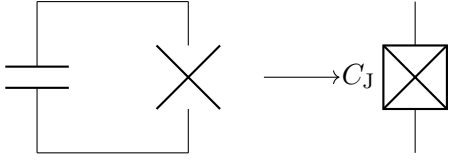


Hamiltonian

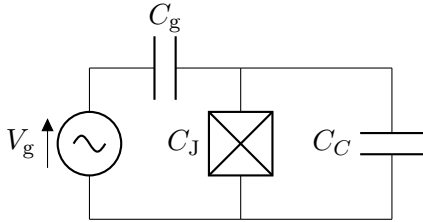
$$\hat{H} = -E_{J1} \cos \hat{\phi}_1 - E_{J2} \cos \hat{\phi}_2 \quad (401)$$

$\hat{\phi}$ Phasendifferenz an einer Junction

43.2 TODO



TODO: Include schaltplan



Ladeenergie?

$$E_C = \frac{(2e)^2}{C} \quad (402)$$

Josephson-Energie?

$$E_J = \frac{I_0 \phi_0}{2\pi} \quad (403)$$

TODO: Was ist I0

Induktive Energie

$$E_L = \frac{\varphi_0^2}{L} \quad (404)$$

Gate Ladung
auch Offset charge

$$n_g = \frac{C_g V_g}{2e} \quad (405)$$

Anharmonizität

$$\alpha := \omega_{1 \leftrightarrow 2} - \omega_{0 \leftrightarrow 1} \quad (406)$$

		$E_L / (E_J - E_L)$			
		0	$\ll 1$	~ 1	$\gg 1$
$\frac{E_J}{E_C}$	$\ll 1$	cooper-pair box			
	~ 1	quantronium	fluxonium		
	$\gg 1$	transmon			flux qubit
	$\gg \gg 1$			phase qubit	

charge noise sensitivity ↑

flux noise sensitivity ↘

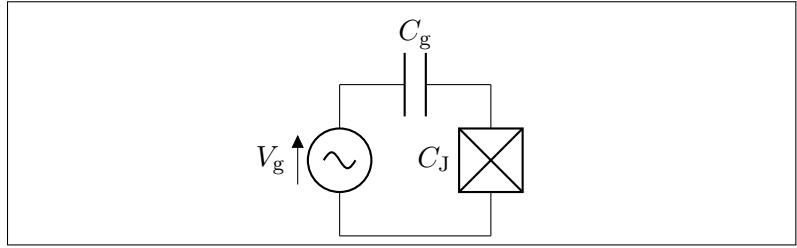
critical current noise sensitivity ↙

43.3 Cooper Paar Box (QPB) Qubit

- = voltage bias junction
- = charge qubit?

Cooper Pair Box / Charge Qubit

- Große Anharmonizität
- Sensibel für charge noise



Hamiltonian

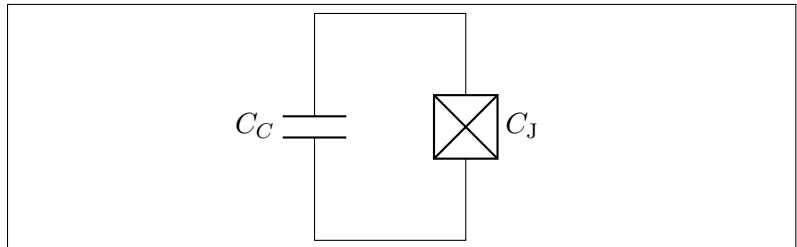
$$\hat{H} = 4E_C(\hat{n} - n_g)^2 - E_J \cos \hat{\phi} \quad (407)$$

$$= \sum_n \left[4E_C(n - n_g)^2 |n\rangle \langle n| - \frac{E_J}{2} |n\rangle \langle n+1| + |n+1\rangle \langle n| \right] \quad (408)$$

43.4 Transmon Qubit

Transmon Qubit
Josephson-Kontakt mit einem parallelen **kapazitiven Element**.

- Charge noise resilient
- Geringe Anharmonizität α

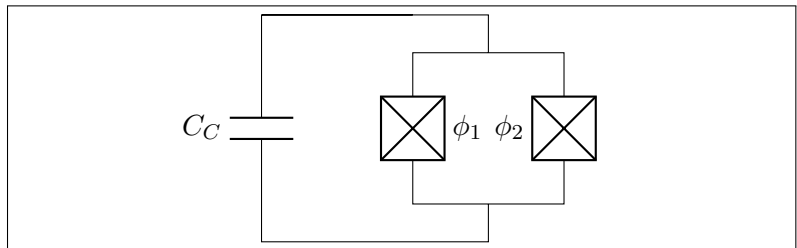


Hamiltonian

$$\hat{H} = 4E_C \hat{n}^2 - E_J \cos \hat{\phi} \quad (409)$$

43.4.1 Tunable Transmon Qubit

Frequency tunable transmon
Durch Nutzung eines **SQUID** anstatt eines **Josephson-Kontakts**, ist die Frequenz des Qubits durch ein externes Magnetfeld einstellbar



Josephson Energie

$$E_{J,\text{eff}}(\Phi_{\text{ext}}) = (E_{J1} + E_{J2}) \sqrt{\cos^2 \left(\pi \frac{\Phi_{\text{ext}}}{\Phi_0} \right) + d^2 \sin^2 \left(\pi \frac{\Phi_{\text{ext}}}{\Phi_0} \right)} \quad (410)$$

$d = (E_{J1} - E_{J2}) / (E_{J1} + E_{J2})$ Asymmetrie

Hamiltonian

$$\hat{H} = 4E_C \hat{n}^2 - \frac{1}{2} E_{J,\text{eff}}(\Phi_{\text{ext}}) \sum_n [|n\rangle \langle n+1| + |n+1\rangle \langle n|] \quad (411)$$

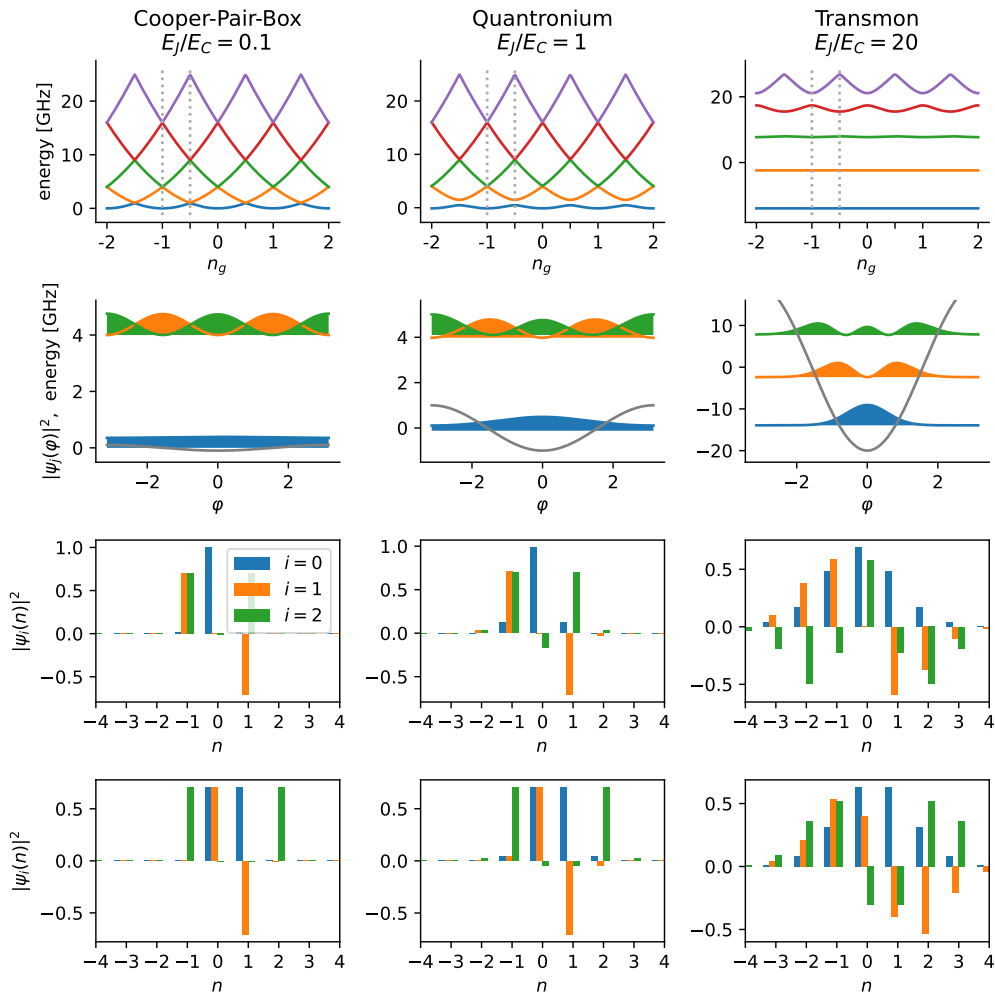
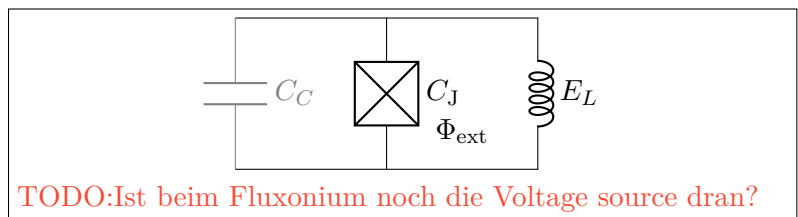


Abbildung 3: Transmon and so TODO

43.5 Phase Qubit

Phase Qubit



Hamiltonian

$$\hat{H} = E_C \hat{n}^2 - E_J \cos \hat{\delta} + E_L (\hat{\delta} - \delta_s)^2 \quad (412)$$

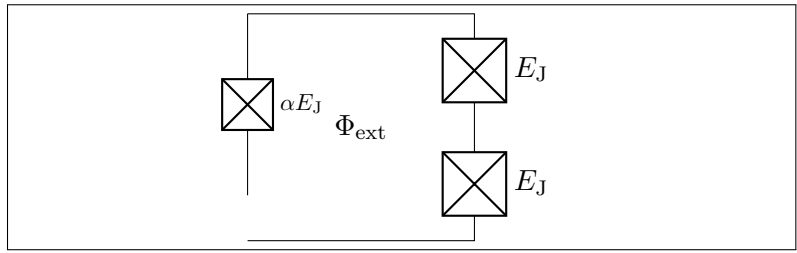
$$\delta = \frac{\phi}{\phi_0}$$

This is only a test

43.6 Flux Qubit

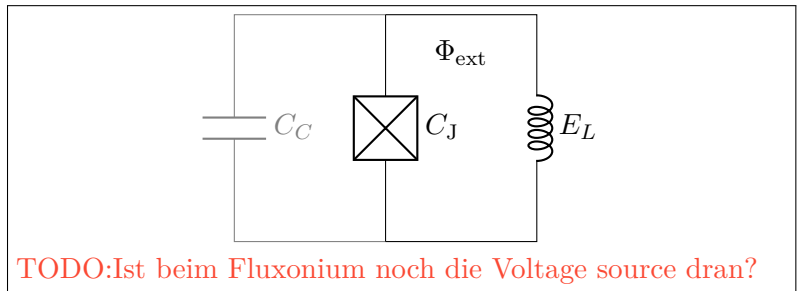
TODO: TODO

Flux Qubit / Persistent current qubit



43.7 Fluxonium Qubit

Fluxonium Qubit
Josephson-Kontakt mit einem parallelen **induktiven Element**. Anstatt zu tunneln, können die Cooper-Paare über das induktive Element auf die Insel gelangen. Das induktive Element besteht aus sehr vielen parallelen Josephson-Kontakten um parasitische Kapazitäten zu vermeiden.



TODO:Ist beim Fluxonium noch die Voltage source dran?

Hamiltonian

$$\hat{H} = 4E_C \hat{n}^2 - E_J \cos \hat{\delta} + E_L (\hat{\delta} - \delta_s)^2 \quad (413)$$

$$E_C = \frac{(2e)^2}{2C}, E_L = \frac{\varphi_0^2}{2L}, \delta_s = \frac{\varphi_s}{\varphi_0}$$

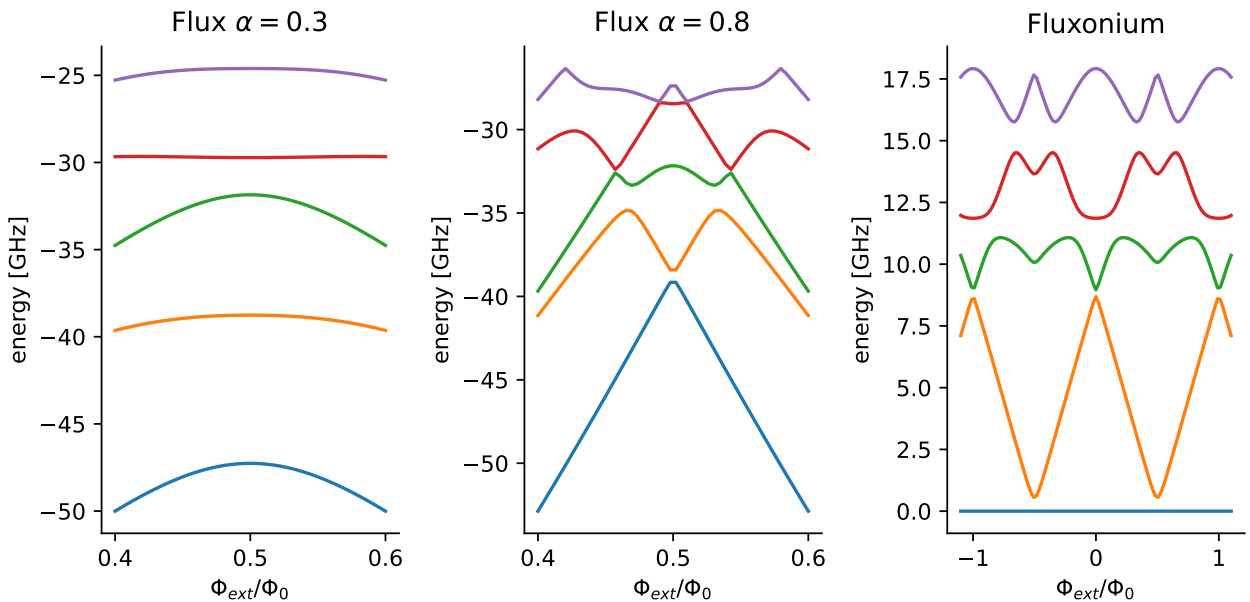


Abbildung 4: img/

44 Zwei-Niveau System

Resonanzfrequenz

$$\omega_{21} = \frac{E_2 - E_1}{\hbar} \quad (414)$$

TODO:sollte das nicht 10 sein?

Rabi-Oszillationen

$$\Omega_{TODD} \quad (415)$$

ω_{21} Resonanzfrequenz des Energieübergangs, Ω Rabi-Frequenz

44.1 Ramsey Interferometrie

q

45 Noise und Dekohärenz

Longitudinale Relaxationsrate

$\Gamma_{1\downarrow}: |1\rangle \rightarrow |0\rangle$
 $\Gamma_{1\uparrow}: |0\rangle \rightarrow |1\rangle$

$$\Gamma_1 = \frac{1}{T_1} = \Gamma_{1\uparrow} + \Gamma_{1\downarrow} \quad (416)$$

Longitudinale Relaxationsrate

Reine Phasenverschiebung

$$\Gamma_\phi \quad (417)$$

Transversale Relaxationsrate

$$\Gamma_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{\Gamma_1}{2} + \Gamma_\phi \quad (418)$$

Bloch-Redfield Dichtematrix
 2-Niveau System schwach an
 Noise Quellen mit kurzer
 Korrelationszeit gekoppelt

$$\rho_{BR} = \begin{pmatrix} 1 + (|\alpha|^2 - 1) e^{-\Gamma_1 t} & \alpha \beta^* e^{-\Gamma_2 t} \\ \alpha^* \beta e^{-\Gamma_2 t} & |\beta|^2 e^{-\Gamma_1 t} \end{pmatrix} \quad (419)$$

Teil X

Computergestützte Physik

46 Quanten-Vielteilchenphysik

TODO:TODO

46.1 Importance sampling / Stichprobenentnahme nach Wichtigkeit

TODO:Monte Carlo

46.2 Matrix Produktzustände

47 Electronic structure theory

Electronic structure Hamiltonian	$\hat{H} = \hat{T}_e + \hat{T}_n + V_{e\leftrightarrow e} + V_{\eta\leftrightarrow e} + V_{\eta\leftrightarrow\eta} \quad (420)$
	with
	$\hat{T}_i = - \sum_{n=1}^{N_i} \frac{\hbar^2}{2m_i} \nabla_n^2 \quad (421)$
	$\hat{V}_{i\leftrightarrow j} = - \sum_{k,l} \frac{Z_i Z_j e^2}{ \vec{r}_k - \vec{r}_l } \quad (422)$
	\hat{T} kinetic energy, \hat{V} electrostatic potential, e electrons, n nucleons

Molekularfeldnäherung Ersetzt 2-Teilchen Operator durch 1-Teilchen Operator	$\frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{e^2}{ \vec{r}_i - \vec{r}_j } \approx \sum_i V_{\text{eff}}(\vec{r}_i) \quad (423)$
	Beispiel für Coulomb Wechselwirkung zwischen Elektronen

47.1 Tight-binding

47.2 Dichtefunktionaltheorie (DFT)

47.2.1 Hartree-Fock

- comp:misc:mean_field theory
- Self-interaction free: Self interaction is cancelled out by the Fock-term

Hartree-Fock Gleichung	$\left(\hat{T} + \hat{V}_{\text{en}} + \hat{V}_{\text{HF}}^{\xi} \right) \varphi_{\xi}(x) = \epsilon_{\xi} \varphi_{\xi}(x) \quad (424)$ <p>φ_{ξ} ein-Teilchen Wellenfunktion des ξ-ten Orbitals, \hat{T} kinetische Energie der Elektronen, \hat{V}_{en} Electron-Kern Anziehung, \hat{V}_{HF} comp:dft:hf:potential</p>
------------------------	---

Hartree Fock Potential	$V_{\text{HF}}^{\xi}(\vec{r}) = \sum_{\vartheta} \int dx' \frac{e^2}{ \vec{r} - \vec{r}' } \left(\underbrace{ \varphi_{\xi}(x') ^2}_{\text{Hartree-Term}} - \underbrace{\frac{\varphi_{\vartheta}^*(x') \varphi_{\xi}(x') \varphi_{\vartheta}(x)}{\varphi_{\xi}(x)}}_{\text{Fock-Term}} \right) \quad (425)$
------------------------	---

Self-consistent field cycle

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none">1. Initial guess for ψ2. Solve SG for each particle3. Make new guess for ψ |
|--|

48 Atomic dynamics

48.1 Kohn-Sham

TODO:TODO

48.2 Born-Oppenheimer Näherung

TODO:TODO, BO surface

48.3 Molekulardynamik

Statistical method

TODO:ab-initio MD, force-field MD

49 Gradientenverfahren

TODO:TODO

50 Physikalische Größen

50.1 SI-Basisgrößen

Zeit

Symbol: t Unit: 1 s

Länge

Symbol: l Unit: 1 m

Masse

Symbol: m Unit: 1 kg

Temperatur

Symbol: T Unit: 1 K

Elektrischer Strom

Symbol: I Unit: 1 A

Stoffmenge

Symbol: n Unit: 1 mol

Lichtstärke

Symbol: I_V Unit: 1 cd

50.2 Mechanik

Kraft	Symbol: \vec{F} Unit: $1 \text{ N} = 1 \text{ kgm/s}^2$
Federkonstante	Symbol: k Unit: $1 \text{ N m}^{-1} = 1 \text{ kg/s}^2$
Geschwindigkeit	Symbol: \vec{v} Unit: 1 m s^{-1}
Drehmoment	Symbol: τ Unit: $1 \text{ N m} = 1 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$

50.3 Thermodynamik

Volumen d dimensionales Volumen	Symbol: V Unit: 1 m^d
Wärmekapazität	Symbol: C Unit: 1 J K^{-1}

50.4 Elektrodynamik

Ladung	Symbol: q Unit: $1 \text{ C} = 1 \text{ A s}$
Ladungsdichte	Symbol: ρ Unit: 1 C/m^3

50.5 Sonstige

51 Konstanten

Plancksches Wirkumsquantum	Symbol: h Definierter Wert $6.62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ $4.135667969 \dots \cdot 10^{-15} \text{ eV s}$
Universelle Gaskonstante Proportionalitätskonstante für ideale Gase	Symbol: R Definierter Wert $8.31446261815324 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}$ $N_A \cdot k_B$ N_A Avogadro-Konstante, k_B Boltzmann-Konstante
Avogadro-Konstante Anzahl der Moleküle pro mol	Symbol: N_A Definierter Wert $6.02214076 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol}$

Boltzmann-Konstante
Temperatur-Energie
Umrechnungsfaktor

Symbol: k_B
Definierter Wert
 $1.380649 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

Faraday-Konstante
Elektrische Ladung von
einem Mol einfach geladener
Ionen

Symbol: F
Definierter Wert
 $9.64853321233100184 \text{ C mol}^{-1}$
 $N_A e$
 N_A Avogadro-Konstante, k_B Boltzmann-Konstante

Teil XI Chemie

52 Periodensystem

		metalloid										metal												
		halogen					alkalimetal					transitionmetal					lanthanoide							
		alkalineearthmetal					nonmetal					noble gas												
1	H 1.008																					He 4.003		
2	Li 6.946	Be 9.012																					Ne 20.180	
3	Na 22.990	Mg 24.305																					Ar 39.948	
4	K 39.098	Ca 40.078	Sc 44.956	Ti 47.867	V 50.942	Cr 51.996	Mn 54.938	Fe 55.845	Co 58.933	Ni 58.693	Cu 63.546	Zn 65.382	Ga 69.723	Ge 72.631	As 74.922	Se 78.972	Br 79.905	Kr 83.798						
5	Rb 85.468	Sr 87.621	Y 88.906	Zr 91.224	Nb 92.906	Mo 95.951	Tc 98.906	Ru 101.072	Rh 102.906	Pd 106.421	Ag 107.868	Cd 112.414	In 114.818	Sn 118.711	Sb 121.760	Te 127.603	I 126.904	Xe 131.294						
6	Cs 132.905	Ba 137.328	La 138.905	Hf 178.492	Ta 180.948	W 183.841	Re 186.207	Os 190.233	Ir 192.217	Pt 195.085	Au 196.967	Hg 200.592	Tl 204.382	Pb 207.210	Bi 208.980	Po 209.980	At 209.987	Rn 222.000						
7	Fr 223.020	Ra 226.025	Ac 227.028	Rf 261.109	Db 262.114	Sg 263.118	Bh 262.123	Hs 265.269	Mt 268.000	Ds 281.000	Rg 280.000	Cn 277.000	Nh 287.000	Fl 289.000	Mc 288.000	Lv 293.000	Ts 292.000	Og 294.000						
		58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71									
		Ce 140.116	Pr 140.908	Nd 144.242	Pm 146.915	Sm 150.362	Eu 151.964	Gd 157.253	Tb 158.925	Dy 162.500	Ho 164.930	Er 167.259	Tm 168.934	Yb 173.045	Lu 174.967									
		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103									
		Th 232.038	Pa 231.036	U 238.029	Np 237.048	Pu 244.064	Am 243.061	Cm 247.070	Bk 247.000	Cf 251.000	Es 252.000	Fm 257.095	Md 258.000	No 259.000	Lr 266.000									

53 stuff

Kovalente Bindung

Bindungen zwischen Atomen die durch geteilte Elektronen, welche Elektronenpaare bilden, gebildet werden.

Teil XII

Anhang

Abbildungsverzeichnis

1	[?]	47
2	[?]	47
3	Transmon and so TODO	53
4	img/	54

Tabellenverzeichnis

1	caption	17
2	In 2D gibt es 5 verschiedene Bravais-Gitter	38
3	In 3D gibt es 14 verschiedene Bravais-Gitter	39

54 Liste der Elemente

Wasserstoff English: Hydrogen farbloses Gas (H ₂)	Symbol: H Number: 1 Kristallstruktur: hex Elektronenkonfiguration: 1s[1] magnetic_ordering: diamagnetic atomic_mass: 1.0081 set: nonmetal
Helium English: Helium farbloses Gas	Symbol: He Number: 2 Kristallstruktur: hcp Elektronenkonfiguration: 1s[1] magnetic_ordering: diamagnetic atomic_mass: 4.0026022 set: noblegas
Lithium English: Lithium silbrig weiß/grau	Symbol: Li Number: 3 Kristallstruktur: bcc Elektronenkonfiguration: He 2s[1] magnetic_ordering: paramagnetic atomic_mass: 6.946 set: alkalimetal
Beryllium English: Beryllium weiß-grau metallisch	Symbol: Be Number: 4 Kristallstruktur: hcp Elektronenkonfiguration: He 2s[2] magnetic_ordering: diamagnetic atomic_mass: 9.01218315 set: alkalineearthmetal

Bor
English: Boron
schwarz

Symbol: B
Number: 5
Kristallstruktur: rho
Elektronenkonfiguration: He 2s[2] 2p[1]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 10.811
set: metalloid

Kohlenstoff
English: Carbon
schwarz (Graphit); farblos
(Diamant)

Symbol: C
Number: 6
Kristallstruktur: hex
Elektronenkonfiguration: He 2s[2] 2p[2]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 12.01112
set: nonmetal

Stickstoff
English: Nitrogen
farbloses Gas

Symbol: N
Number: 7
Kristallstruktur: hex
Elektronenkonfiguration: He 2s[2] 2p[3]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 14.006714
set: nonmetal

Sauerstoff
English: Oxygen
farbloses Gas

Symbol: O
Number: 8
Kristallstruktur: sc
Elektronenkonfiguration: He 2s[2] 2p[4]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 15.99915
set: nonmetal

Fluor
English: Fluorine
blasses, gelbliches Gas

Symbol: F
Number: 9
refractive_index: 1.000195
Kristallstruktur: sc
Elektronenkonfiguration: He 2s[2] 2p[5]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 18.9984031636
set: halogen

Neon
English: Neon
farbloses Gas

Symbol: Ne
Number: 10
refractive_index: 1.000067
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: He 2s[2] 2p[6]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 20.17976
set: noblegas

Natrium
English: Sodium
silbrig weiß

Symbol: Na
Number: 11
Kristallstruktur: bcc
Elektronenkonfiguration: Ne 3s[1]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 22.989769282
set: alkalimetal

Magnesium
English: Magnesium
silbrig weiß

Symbol: Mg
Number: 12
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Ne 3s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 24.30524
set: alkalineearthmetal

Aluminium
English: Aluminum
silbrig

Symbol: Al
Number: 13
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: Ne 3s[2] 3p[1]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 26.98153857
set: metal

Silicium
English: Silicon
dunkelgrau, bläulicher
Farbton

Symbol: Si
Number: 14
Kristallstruktur: dc
Elektronenkonfiguration: Ne 3s[2] 3p[2]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 28.08528
set: metalloid

Phosphor
English: Phosphorus
weiß-beige (W); dunkelrot
(R); schwarz (S)

Symbol: P
Number: 15
refractive_index: 1.001212
Kristallstruktur: orth
Elektronenkonfiguration: Ne 3s[2] 3p[3]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 30.9737619985
set: nonmetal

Schwefel
English: Sulfur
gelb

Symbol: S
Number: 16
refractive_index: 1.001111
Kristallstruktur: orth
Elektronenkonfiguration: Ne 3s[2] 3p[4]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 32.0632
set: nonmetal

Chlor
English: Chlorine
gelblich-grün

Symbol: Cl
Number: 17
refractive_index: 1.000773
Kristallstruktur: orth
Elektronenkonfiguration: Ne 3s[2] 3p[5]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 35.4535
set: halogen

Argon
English: Argon
farbloses Gas

Symbol: Ar
Number: 18
refractive_index: 1.000281
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: Ne 3s[2] 3p[6]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 39.9481
set: noblegas

Kalium
English: Potassium
silbrig weiß

Symbol: K
Number: 19
Kristallstruktur: bcc
Elektronenkonfiguration: Ar 4s[1]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 39.09831
set: alkalimetal

Calcium
English: Calcium
silbrig weiß

Symbol: Ca
Number: 20
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: Ar 4s[2]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 40.0784
set: alkalineearthmetal

Scandium
English: Scandium
silbrig weiß

Symbol: Sc
Number: 21
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Ar 3d[1] 4s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 44.9559085
set: transitionmetal

Titan
English: Titanium
silbrig metallisch

Symbol: Ti
Number: 22
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Ar 3d[2] 4s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 47.8671
set: transitionmetal

Vanadium
English: Vanadium
stahlgrau metallisch, bläulich
schimmernd

Symbol: V
Number: 23
Kristallstruktur: bcc
Elektronenkonfiguration: Ar 3d[3] 4s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 50.94151
set: transitionmetal

Chrom
English: Chromium
silbrig metallisch

Symbol: Cr
Number: 24
Kristallstruktur: bcc
Elektronenkonfiguration: Ar 3d[5] 4s[1]
magnetic_ordering: antiferromagnetic
atomic_mass: 51.99616
set: transitionmetal

Mangan
English: Manganese
silbrig metallisch (Stahlweiß)

Symbol: Mn
Number: 25
Kristallstruktur: bcc
Elektronenkonfiguration: Ar 3d[5] 4s[2]
magnetic_ordering: antiferromagnetic
atomic_mass: 54.9380443
set: transitionmetal

Eisen
English: Iron
metallisch glänzend mit einem
gräulichen Farbton

Symbol: Fe
Number: 26
Kristallstruktur: bcc
Elektronenkonfiguration: Ar 3d[6] 4s[2]
magnetic_ordering: ferromagnetic
atomic_mass: 55.8452
set: transitionmetal

Cobalt
English: Cobalt
stahlgrauer metallisch
glänzender Feststoff

Symbol: Co
Number: 27
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Ar 3d[7] 4s[2]
magnetic_ordering: ferromagnetic
atomic_mass: 58.9331944
set: transitionmetal

Nickel
English: Nickel
lustrous, metallic, and silver
with a gold tinge

Symbol: Ni
Number: 28
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: Ar 3d[8] 4s[2]
magnetic_ordering: ferromagnetic
atomic_mass: 58.69344
set: transitionmetal

Kupfer
English: Copper
rotbraun, metallisch

Symbol: Cu
Number: 29
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: Ar 3d[10] 4s[1]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 63.5463
set: transitionmetal

Zink
English: Zinc
bläulich blassgrau

Symbol: Zn
Number: 30
refractive_index: 1.00205
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Ar 3d[10] 4s[2]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 65.382
set: transitionmetal

Gallium
English: Gallium
silbrig weiß

Symbol: Ga
Number: 31
Kristallstruktur: orth
Elektronenkonfiguration: Ar 3d[10] 4s[2] 4p[1]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 69.7231
set: metal

Germanium
English: Germanium
gräulich weiß

Symbol: Ge
Number: 32
Kristallstruktur: dc
Elektronenkonfiguration: Ar 3d[10] 4s[2] 4p[2]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 72.6308
set: metalloid

Arsen
English: Arsenic
metallisch grau, gelb oder
schwarz

Symbol: As
Number: 33
refractive_index: 1.001552
Kristallstruktur: rho
Elektronenkonfiguration: Ar 3d[10] 4s[2] 4p[3]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 74.9215956
set: metalloid

Selen
English: Selenium
grau, glänzend

Symbol: Se
Number: 34
refractive_index: 1.000895
Kristallstruktur: hex
Elektronenkonfiguration: Ar 3d[10] 4s[2] 4p[4]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 78.9718
set: metalloid

Brom
English: Bromine
rotbraun (gasförmig);
rotbraun (flüssig); metallisch
glänzend (fest)

Symbol: Br
Number: 35
refractive_index: 1.001132
Kristallstruktur: orth
Elektronenkonfiguration: Ar 3d[10] 4s[2] 4p[5]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 79.90479
set: halogen

Krypton
English: Krypton
farbloses Gas

Symbol: Kr
Number: 36
refractive_index: 1.000427
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: Ar 3d[10] 4s[2] 4p[6]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 83.7982
set: noblegas

Rubidium
English: Rubidium
silbrig weiß

Symbol: Rb
Number: 37
Kristallstruktur: bcc
Elektronenkonfiguration: Kr 5s[1]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 85.46783
set: alkalimetal

Strontium
English: Strontium
silbrig weiß metallisch

Symbol: Sr
Number: 38
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: Kr 5s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 87.621
set: alkalineearthmetal

Yttrium
English: Yttrium
silbrig weiß

Symbol: Y
Number: 39
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Kr 4d[1] 5s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 88.905842
set: transitionmetal

Zirconium
English: Zirconium
silbrig weiß

Symbol: Zr
Number: 40
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Kr 4d[2] 5s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 91.2242
set: transitionmetal

Niob
English: Niobium
grau metallisch glänzend

Symbol: Nb
Number: 41
Kristallstruktur: bcc
Elektronenkonfiguration: Kr 4d[4] 5s[1]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 92.906372
set: transitionmetal

Molybdän
English: Molybdenum
grau metallisch

Symbol: Mo
Number: 42
Kristallstruktur: bcc
Elektronenkonfiguration: Kr 4d[5] 5s[1]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 95.951
set: transitionmetal

Technetium
English: Technetium
silbrig grau metallisch

Symbol: Tc
Number: 43
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Kr 4d[5] 5s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 98.9063
set: transitionmetal

Ruthenium
English: Ruthenium
silbrig weiß metallisch

Symbol: Ru
Number: 44
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Kr 4d[7] 5s[1]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 101.072
set: transitionmetal

Rhodium
English: Rhodium
silbrig weiß metallisch

Symbol: Rh
Number: 45
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: Kr 4d[8] 5s[1]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 102.905502
set: transitionmetal

Palladium
English: Palladium
silbrig, weiß, metallisch

Symbol: Pd
Number: 46
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: Kr 4d[10]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 106.421
set: transitionmetal

Silber
English: Silver
weißglänzend, metallisch

Symbol: Ag
Number: 47
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: Kr 4d[10] 5s[1]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 107.86822
set: transitionmetal

Cadmium
English: Cadmium
silbrig grau metallisch

Symbol: Cd
Number: 48
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Kr 4d[10] 5s[2]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 112.4144
set: transitionmetal

Indium
English: Indium
silbrig glänzend grau

Symbol: In
Number: 49
Kristallstruktur: tetr
Elektronenkonfiguration: Kr 4d[10] 5s[2] 5p[1]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 114.8181
set: metal

Zinn
English: Tin
silbrig glänzend (-Zinn), grau
(-Zinn)

Symbol: Sn
Number: 50
Kristallstruktur: tetr
Elektronenkonfiguration: Kr 4d[10] 5s[2] 5p[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 118.7107
set: metal

Antimon
English: Antimony
silbrig glänzend grau

Symbol: Sb
Number: 51
Kristallstruktur: rho
Elektronenkonfiguration: Kr 4d[10] 5s[2] 5p[3]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 121.7601
set: metalloid

Tellur
English: Tellurium
silberweiß, metallisch
glänzend

Symbol: Te
Number: 52
refractive_index: 1.000991
Kristallstruktur: hex
Elektronenkonfiguration: Kr 4d[10] 5s[2] 5p[4]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 127.603
set: metalloid

Iod
English: Iodine
dunkel-violett (gasförmig);
grauschwarz, glänzend (fest)

Symbol: I
Number: 53
Kristallstruktur: orth
Elektronenkonfiguration: Kr 4d[10] 5s[2] 5p[5]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 126.904473
set: halogen

Xenon
English: Xenon
farbloses Gas

Symbol: Xe
Number: 54
refractive_index: 1.000702
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: Kr 4d[10] 5s[2] 5p[6]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 131.2936
set: noblegas

Caesium
English: Caesium
goldgelb glänzend

Symbol: Cs
Number: 55
Kristallstruktur: bcc
Elektronenkonfiguration: Xe 6s[1]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 132.905451966
set: alkalimetal

Barium
English: Barium
weiß-grau metallisch

Symbol: Ba
Number: 56
Kristallstruktur: bcc
Elektronenkonfiguration: Xe 6s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 137.3277
set: alkalineearthmetal

Lanthan
English: Lanthanum
silbrig weiß

Symbol: La
Number: 57
Kristallstruktur: dhcp
Elektronenkonfiguration: Xe 5d[1] 6s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 138.905477
set: lanthanoide

Cer
English: Cerium
silbrig weiß

Symbol: Ce
Number: 58
Kristallstruktur: dhcp
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[1] 5d[1] 6s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 140.1161
set: lanthanoide

Praseodym
English: Praseodymium
silbrig weiß, gelblicher
Farbton

Symbol: Pr
Number: 59
Kristallstruktur: dhcp
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[3] 6s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 140.907662
set: lanthanoide

Neodym
English: Neodymium
silbrigweiß, gelblicher Farbton

Symbol: Nd
Number: 60
Kristallstruktur: dhcp
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[4] 6s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 144.2423
set: lanthanoide

Promethium
English: Promethium
metallisch

Symbol: Pm
Number: 61
Kristallstruktur: dhcp
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[5] 6s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 146.9151
set: lanthanoide

Samarium
English: Samarium
silbrig weiß

Symbol: Sm
Number: 62
Kristallstruktur: rho
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[6] 6s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 150.362
set: lanthanoide

Europium
English: Europium
silbrig weiß

Symbol: Eu
Number: 63
Kristallstruktur: bcc
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[7] 6s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 151.9641
set: lanthanoide

Gadolinium
English: Gadolinium
silbrig weiß

Symbol: Gd
Number: 64
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[7] 5d[1] 6s[2]
magnetic_ordering: ferromagnetic
atomic_mass: 157.253
set: lanthanoide

Terbium
English: Terbium
silbrig weiß

Symbol: Tb
Number: 65
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Xe 4f^[9] 6s^[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 158.925352
set: lanthanoide

Dysprosium
English: Dysprosium
silvery white

Symbol: Dy
Number: 66
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Xe 4f^[10] 6s^[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 162.5001
set: lanthanoide

Holmium
English: Holmium
silbrig weiß

Symbol: Ho
Number: 67
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Xe 4f^[11] 6s^[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 164.930332
set: lanthanoide

Erbium
English: Erbium
silbrig weiß

Symbol: Er
Number: 68
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Xe 4f^[12] 6s^[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 167.2593
set: lanthanoide

Thulium
English: Thulium
silbrig grau

Symbol: Tm
Number: 69
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Xe 4f^[13] 6s^[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 168.934222
set: lanthanoide

Ytterbium
English: Ytterbium
silbrig weiß

Symbol: Yb
Number: 70
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: Xe 4f^[14] 6s^[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 173.0451
set: lanthanoide

Lutetium
English: Lutetium
silbrig weiß

Symbol: Lu
Number: 71
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[14] 5d[1] 6s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 174.96681
set: lanthanoide

Hafnium
English: Hafnium
stahlgrau

Symbol: Hf
Number: 72
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[14] 5d[2] 6s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 178.492
set: transitionmetal

Tantal
English: Tantalum
grau

Symbol: Ta
Number: 73
Kristallstruktur: bcc
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[14] 5d[3] 6s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 180.947882
set: transitionmetal

Wolfram
English: Tungsten
gräulich weiß, glänzend

Symbol: W
Number: 74
Kristallstruktur: bcc
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[14] 5d[4] 6s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 183.841
set: transitionmetal

Rhenium
English: Rhenium
gräulich weiß

Symbol: Re
Number: 75
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[14] 5d[5] 6s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 186.2071
set: transitionmetal

Osmium
English: Osmium
bläulich grau

Symbol: Os
Number: 76
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[14] 5d[6] 6s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 190.233
set: transitionmetal

Iridium
English: Iridium
silbrig weiß

Symbol: Ir
Number: 77
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[14] 5d[7] 6s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 192.2173
set: transitionmetal

Platin
English: Platinum
grau-weiß

Symbol: Pt
Number: 78
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[14] 5d[9] 6s[1]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 195.0849
set: transitionmetal

Gold
English: Gold
metallisch gelb

Symbol: Au
Number: 79
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[14] 5d[10] 6s[1]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 196.9665695
set: transitionmetal

Quecksilber
English: Mercury
silbrig weiß

Symbol: Hg
Number: 80
refractive_index: 1.000933
Kristallstruktur: rho
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[14] 5d[10] 6s[2]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 200.5923
set: transitionmetal

Thallium
English: Thallium
silbrig weiß

Symbol: Tl
Number: 81
Kristallstruktur: hcp
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[14] 5d[10] 6s[2] 6p[1]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 204.38204
set: metal

Blei
English: Lead
bläulich weiß

Symbol: Pb
Number: 82
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[14] 5d[10] 6s[2] 6p[2]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 207.21
set: metal

Bismut
English: Bismuth
glänzend silberweiß

Symbol: Bi
Number: 83
Kristallstruktur: rho
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[14] 5d[10] 6s[2] 6p[3]
magnetic_ordering: diamagnetic
atomic_mass: 208.980401
set: metal

Polonium
English: Polonium
silbrig

Symbol: Po
Number: 84
Kristallstruktur: sc
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[14] 5d[10] 6s[2] 6p[4]
magnetic_ordering: nonmagnetic
atomic_mass: 209.98
set: metal

Astat
English: Astatine
metallisch

Symbol: At
Number: 85
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[14] 5d[10] 6s[2] 6p[5]
atomic_mass: 209.9871
set: halogen
Kristallstruktur: fcc

Radon
English: Radon
farbloses Gas

Symbol: Rn
Number: 86
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: Xe 4f[14] 5d[10] 6s[2] 6p[6]
magnetic_ordering: nonmagnetic
atomic_mass: 222
set: noble gas

Francium

Symbol: Fr
Number: 87
Kristallstruktur: bcc
Elektronenkonfiguration: Rn 7s[1]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 223.0197
set: alkalimetal

Radium
English: Radium
silbrig-weiß-metallisch

Symbol: Ra
Number: 88
Kristallstruktur: bcc
Elektronenkonfiguration: Rn 7s[2]
magnetic_ordering: nonmagnetic
atomic_mass: 226.0254
set: alkaline earth metal

Actinium
English: Actinium
silbrig

Symbol: Ac
Number: 89
Elektronenkonfiguration: Rn 6d[1] 7s[2]
atomic_mass: 227.0278
set: actinoid
Kristallstruktur: fcc

<p>Thorium English: Thorium silbrig weiß</p>	<p>Symbol: Th Number: 90 Kristallstruktur: fcc Elektronenkonfiguration: Rn 6d[2] 7s[2] magnetic_ordering: paramagnetic atomic_mass: 232.03774 set: actinoide</p>
<p>Protactinium English: Protactinium hell, silbrig, metallisch glänzend</p>	<p>Symbol: Pa Number: 91 Kristallstruktur: tetr Elektronenkonfiguration: Rn 5f[2] 6d[1] 7s[2] magnetic_ordering: paramagnetic atomic_mass: 231.035882 set: actinoide</p>
<p>Uran English: Uranium silberweiß</p>	<p>Symbol: U Number: 92 Kristallstruktur: orth Elektronenkonfiguration: Rn 5f[3] 6d[1] 7s[2] magnetic_ordering: paramagnetic atomic_mass: 238.028913 set: actinoide</p>
<p>Neptunium English: Neptunium silbrig</p>	<p>Symbol: Np Number: 93 Kristallstruktur: orth Elektronenkonfiguration: Rn 5f[4] 6d[1] 7s[2] magnetic_ordering: paramagnetic atomic_mass: 237.0482 set: actinoide</p>
<p>Plutonium English: Plutonium silbriges Metall</p>	<p>Symbol: Pu Number: 94 Kristallstruktur: mon Elektronenkonfiguration: Rn 5f[6] 7s[2] magnetic_ordering: paramagnetic atomic_mass: 244.0642 set: actinoide</p>
<p>Americium English: Americium silbrig-weißes Metall</p>	<p>Symbol: Am Number: 95 Kristallstruktur: dhcp Elektronenkonfiguration: Rn 5f[7] 7s[2] magnetic_ordering: paramagnetic atomic_mass: 243.061375 set: actinoide</p>

Curium
English: Curium
silbrig-weißes Metall

Symbol: Cm
Number: 96
Kristallstruktur: dhcp
Elektronenkonfiguration: Rn 5f[7] 6d[1] 7s[2]
magnetic_ordering: antiferromagnetic
atomic_mass: 247.0703
set: actinoide

Berkelium
English: Berkelium
silberweiß

Symbol: Bk
Number: 97
Kristallstruktur: dhcp
Elektronenkonfiguration: Rn 5f[9] 7s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 247
set: actinoide

Californium
English: Californium
silbriges Metall

Symbol: Cf
Number: 98
Elektronenkonfiguration: Rn 5f[10] 7s[2]
atomic_mass: 251
set: actinoide
Kristallstruktur: dhcp

Einsteinium
English: Einsteinium

Symbol: Es
Number: 99
Kristallstruktur: fcc
Elektronenkonfiguration: Rn 5f[11] 7s[2]
magnetic_ordering: paramagnetic
atomic_mass: 252
set: actinoide

Fermium

Symbol: Fm
Number: 100
Elektronenkonfiguration: Rn 5f[12] 7s[2]
atomic_mass: 257.0951
set: actinoide
Kristallstruktur: fcc

Mendelevium

Symbol: Md
Number: 101
Elektronenkonfiguration: Rn 5f[13] 7s[2]
atomic_mass: 258
set: actinoide
Kristallstruktur: fcc

Nobelium

Symbol: No
Number: 102
Elektronenkonfiguration: Rn 5f[14] 7s[2]
atomic_mass: 259
set: actinoide
Kristallstruktur: fcc

Lawrencium	<p>Symbol: Lr Number: 103 Elektronenkonfiguration: Rn 5f[14] 7s[2] 7p[1] atomic_mass: 266 set: actinoide Kristallstruktur: hcp</p>
Rutherfordium	<p>Symbol: Rf Number: 104 Elektronenkonfiguration: Rn 5f[14] 6d[2] 7s[2] atomic_mass: 261.1087 set: transitionmetal Kristallstruktur: hcp</p>
Dubnium	<p>Symbol: Db Number: 105 Elektronenkonfiguration: Rn 5f[14] 6d[3] 7s[2] atomic_mass: 262.1138 set: transitionmetal Kristallstruktur: bcc</p>
Seaborgium	<p>Symbol: Sg Number: 106 Elektronenkonfiguration: Rn 5f[14] 6d[4] 7s[2] atomic_mass: 263.1182 set: transitionmetal Kristallstruktur: bcc</p>
Bohrium	<p>Symbol: Bh Number: 107 Elektronenkonfiguration: Rn 5f[14] 6d[5] 7s[2] atomic_mass: 262.1229 set: transitionmetal Kristallstruktur: hcp</p>
Hassium	<p>Symbol: Hs Number: 108 Elektronenkonfiguration: Rn 5f[14] 6d[6] 7s[2] atomic_mass: 265.269 set: transitionmetal Kristallstruktur: hcp</p>
Meitnerium	<p>Symbol: Mt Number: 109 Kristallstruktur: fcc Elektronenkonfiguration: Rn 5f[14] 6d[7] 7s[2] magnetic_ordering: paramagnetic atomic_mass: 268 set: unknown</p>

Darmstadtium	<p>Symbol: Ds Number: 110 Elektronenkonfiguration: Rn 5f[14] 6d[8] 7s[2] atomic_mass: 281 set: unknown Kristallstruktur: bcc</p>
Roentgenium	<p>Symbol: Rg Number: 111 Elektronenkonfiguration: Rn 5f[14] 6d[9] 7s[2] atomic_mass: 280 set: unknown Kristallstruktur: bcc</p>
Copernicium	<p>Symbol: Cn Number: 112 Elektronenkonfiguration: Rn 5f[14] 6d[10] 7s[2] atomic_mass: 277 set: unknown Kristallstruktur: bcc</p>
Nihonium	<p>Symbol: Nh Number: 113 Elektronenkonfiguration: Rn 5f[14] 6d[10] 7s[2] 7p[1] atomic_mass: 287 set: unknown Kristallstruktur: hep</p>
Flerovium	<p>Symbol: Fl Number: 114 Elektronenkonfiguration: Rn 5f[14] 6d[10] 7s[2] 7p[2] atomic_mass: 289 set: unknown Kristallstruktur: fcc</p>
Moscovium	<p>Symbol: Mc Number: 115 atomic_mass: 288 Elektronenkonfiguration: Rn 5f[14] 6d[10] 7s[2] 7p[3] set: unknown</p>
Livermorium	<p>Symbol: Lv Number: 116 atomic_mass: 293 Elektronenkonfiguration: Rn 5f[14] 6d[10] 7s[2] 7p[4] set: unknown</p>
Tenness English: Tennessine	<p>Symbol: Ts Number: 117 atomic_mass: 292 Elektronenkonfiguration: Rn 5f[14] 6d[10] 7s[2] 7p[5] set: unknown</p>

Oganesson
English: Oganesson

Symbol: Og
Number: 118
Elektronenkonfiguration: Rn 5f[14] 6d[10] 7s[2] 7p[6]
atomic_mass: 294
set: unknown
Kristallstruktur: fcc
