Quanteninformation

Harald Rieder, 2017

Inhalt

[Mathe-Auffrischung 1](#_Toc473993208)

[Vektoren und Matrizen 1](#_Toc473993209)

[Addition 2](#_Toc473993210)

[Multiplikation 2](#_Toc473993211)

[Weitere Operationen / Besondere Matrizen 4](#_Toc473993212)

[Analysis 6](#_Toc473993213)

[Komplexe Zahlen 6](#_Toc473993214)

[Gruppen 7](#_Toc473993215)

[Vektorräume 7](#_Toc473993216)

[Hilberträume 7](#_Toc473993217)

[Shannonsche Informationstheorie 7](#_Toc473993218)

[Philosophischer Ausflug 7](#_Toc473993219)

[Quantentheorie 7](#_Toc473993220)

[Interpretationen der Quantentheorie 8](#_Toc473993221)

[Quanteninformation 8](#_Toc473993222)

# Mathe-Auffrischung

## Vektoren und Matrizen

Spalten- und Zeilenvektoren mit Indexschreibweise

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ {\mathbf  {a}}={\begin{pmatrix}3\\7\\2\end{pmatrix}}  \quad\quad {\mathbf  {b}}={\begin{pmatrix}4&6&3&7\end{pmatrix}} \quad\quad a_i \quad b_j \] \end{document} | Vektoren | (1) |

Matrizen mit Indexschreibweise

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ {\mathbf  {M}}={\begin{pmatrix}8&2&9\\4&8&2\\8&3&7\\5&9&1\end{pmatrix}} \quad\quad M_{ij} \] \end{document} | Matrix | (2) |

* Spalten- und Zeilenvektoren sind auch nur Matrizen! Ein Spaltenvektor ist eine einspaltige Matrix und ein Zeilenvektor eine einzeilige Matrix.
* Verallgemeinerung: Tensor n-ter Stufe.  Skalare sind Tensoren nullter Stufe, Vektoren Tensoren erster Stufe, Matrizen Tensoren zweiter Stufe, …
* Quadratische Matrizen: Zeilenzahl = Spaltenzahl
* Physik: nur quadratische Matrizen (und kubische Tensoren 3. Stufe, ...) spielen eine Rolle.

Determinanten von Matrizen

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ \det {\mathbf A} =\det {\begin{pmatrix}a_{11}&a_{12}\\a_{21}&a_{22}\end{pmatrix}}=a_{11}a_{22}-a_{12}a_{21} \] \end{document} | Determinanten | (3) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ \footnotesize {\det { \begin{pmatrix}a_{11}&a_{12}&a_{13}\\a_{21}&a_{22}&a_{23}\\a_{31}&a_{32}&a_{33}\end{pmatrix}} =a_{11}a_{22}a_{33}+a_{12}a_{23}a_{31}+a_{13}a_{21}a_{32}-a_{13}a_{22}a_{31}-a_{12}a_{21}a_{33}-a_{11}a_{23}a_{32}} \] \end{document} | DerminantenEntwicklung | (4) |

usw.

### Addition

Matrizen müssen gleiche Anzahl von Spalten und Zeilen haben, damit sie addiert werden können.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[   \begin{pmatrix}     1 & -3 & 2 \\     1 & 2 & 7   \end{pmatrix}   +   \begin{pmatrix}     0 & 3 & 5 \\     2 & 1 & -1   \end{pmatrix}   =   \begin{pmatrix}     1 & 0 & 7 \\     3 & 3 & 6   \end{pmatrix} \quad\quad M_{ij} + N_{ij} \] \end{document} | Matrizenaddition | (5) |

* assoziativ: (M + N) + O = M + (N + O) = M + N + O
* kommutativ: M + N = N + M
* neutrales Element ist die Null-Matrix

### Multiplikation

#### Produkt aus Skalar und Matrix

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ 5 \cdot   \begin{pmatrix}     1 & -3 & 2 \\     1 &  2 & 7   \end{pmatrix}   =   \begin{pmatrix}     5 & -15 & 10 \\     5 & 10  & 35   \end{pmatrix} \quad\quad a M_{ij}  \] \end{document} | Skalarmultiplikation | (6) |

#### Skalarprodukt von Vektoren

Diesmal wird nicht mit einem Skalar multipliziert, sondern das Ergebnis der Multiplikation ist ein Skalar.

Rechts die Schreibweise mit Einsteinscher Summenkonvention: über Indizes, die doppelt vorkommen, wird automatisch summiert.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ c =\sum_{i=1}^m a_i\cdot b_i \quad\quad c = a_i b_i \] \end{document} | Skalarprodukt | (7) |
| Was ist das Produkt von:  %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[   \begin{pmatrix}     1 & -3 & 2    \end{pmatrix} \cdot    \begin{pmatrix}     1 \\ 2 \\ 7   \end{pmatrix} \] \end{document} | AufgabeSkalarprodukt | (8) |
| zur verschiedenen Schreibweise der beiden Vektoren siehe unten |  |  |

* Vektoren, deren Skalarprodukt 0 ergibt, heißen orthogonal.
* Ein Satz von Vektoren ist genau dann linear unabhängig, wenn sich keiner von ihnen als Linearkombination aus den anderen darstellen lässt. Orthogonale Vektoren sind linear unabhängig.

#### Matrizenmultiplikation

Alle Zeilenvektoren der 1. Matrix werden mit allen Spaltenvektoren der 2. Matrix skalarmultipliziert, siehe (7).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[   \begin{pmatrix}     1 & -3 \\     1 & 2    \end{pmatrix}   \cdot   \begin{pmatrix}     0 & 3 \\     2 & 1    \end{pmatrix}   =   \begin{pmatrix}     -8 & 0 \\     4 & 5    \end{pmatrix} \quad\quad C_{ij}=\sum_{s=1}^m A_{is}\cdot B_{sj} \] \end{document} | Matrizenmultiplikation | (9) |

Ist A einzeilig und B einspaltig, dann haben sie beide nur den Index s, und (9) wird zu (7).

* assoziativ: (M N) O = M (N O) = M N O
* **nicht-kommutativ**: M N und N M sind im Allgemeinen verschieden! Matrizen können dadurch Vorgänge modellieren, die bei der Vertauschung einzelner Schritte nicht zum gleichen Ergebnis führen.
* neutrales Element ist die Einheitsmatrix

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ {\mathbf 1} = \begin{pmatrix} 1   &   0 & ... & 0 \\ 0   &   1 & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... \\ 0   &   0 & ... & 1 \\ \end{pmatrix} \quad\quad \delta_{ij} \] \end{document} | Einheitsmatrix | (10) |

#### Tensorprodukt

Beim Tensorprodukt ergeben 2 Vektoren eine Matrix. Dieser Mechanismus ist bereits in (9) enthalten!

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[   \begin{pmatrix}     1 \\ 2 \\ 7   \end{pmatrix} \cdot    \begin{pmatrix}     1 & -3 & 2    \end{pmatrix}  =    \begin{pmatrix}     1 & -3 & 2 \\     2 & -6 & 4 \\     7 & -21 & 14    \end{pmatrix} \] \end{document} | Tensorprodukt | (11) |

* Nicht alle Matrizen können aus Vektoren auf diese Art produziert werden.
* Alle Matrizen lassen sich als Summe von Tensorprodukten darstellen. Nicht eindeutig!
* Enorm wichtig für die Quantentheorie! Produktraum, Dichtematrix, Zusammenhang mit Verschränkung…

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Ist diese Matrix ein Tensorprodukt aus Vektoren?  %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \end{pmatrix} \] \end{document} | AufgabeTensorprodukt | (12) |

Ist Die Einheitsmatrix ein Tensorprodukt?

#### Vektorprodukt

Aus 2 Vektoren entsteht wieder ein Vektor. In der Physik: Drehimpuls, anderes Transformationsverhalten („axialer Vektor“) wie die beiden ursprünglichen Vektoren. Historisch aus der Vorstellung eines dreidimensionalen Raums heraus entstanden.

Kann auch mit dem Levi-Civita-Tensor (total antisymmetrischer Tensor 3. Stufe) ausgedrückt werden:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[    \vec{a}\times\vec{b} = \sum_{i,j,k=1}^3 \varepsilon_{ijk} a_i b_j \vec e_k \quad\quad    c_k = \varepsilon_{ijk} a_i b_j \] \end{document} | Vektorprodukt | (13) |

[Dadurch abweichendes Transformationsverhalten eher einsichtig.]

Kann auf mehr Dimensionen verallgemeinert werden und tritt in der Physik hin und wieder auf. Wir werden ihn in der Quanteninformation eher nicht brauchen.

### Weitere Operationen / Besondere Matrizen

#### Spur

Die Spur einer quadratischen Matrix ist die Summe ihrer Diagonalelemente.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ \mathrm{Tr}     \begin{pmatrix}     1 & -3 & 2 \\     2 & -6 & 4 \\     7 & -21 & 14    \end{pmatrix} = 9 \quad\quad \mathrm{Tr}(M_{ij}) = M_{ii} \] \end{document} | SpurMatrix | (14) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Zeige mit der Indexschreibweise, dass Gilt  %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ \mathrm{Tr}({\mathbf A} \cdot {\mathbf B}) = \mathrm{Tr}({\mathbf B} \cdot {\mathbf A})  \] \end{document} | AufgabeSpur | (15) |

#### Transposition / Transponierte Matrix

Zeilen und Spalten werden getauscht. Indexschreibweise: Zeilen- und Spaltenindizes werden getauscht.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[   \begin{pmatrix}     0 & 3 \\     2 & 1    \end{pmatrix}^T =   \begin{pmatrix}     0 & 2 \\     3 & 1    \end{pmatrix} \quad\quad (M^T)_{ij} = M_{ji} \] \end{document} | Transposition | (16) |

Es gilt:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ ({\mathbf M}^T)^T = {\mathbf M} \quad\quad ({\mathbf A} \cdot {\mathbf B})^T = {\mathbf B}^T \cdot {\mathbf A}^T \] \end{document} | TransponiertesProdukt | (17) |

#### Symmetrische Matrizen / Symmetrierung

Eine symmetrische Matrix ist gleich ihrer Transponierten.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[   \begin{pmatrix}     0 & -3 \\     -3 & 1    \end{pmatrix}^T =   \begin{pmatrix}     0 & -3 \\     -3 & 1    \end{pmatrix} \quad\quad M_{ij}^T = M_{ji} = M_{ij} \quad\quad {\mathbf M}^T = {\mathbf M} \] \end{document} | SymmetrischeMatrizen | (18) |

Erzeugung symmetrischer Matrizen aus beliebigen Matrizen:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ {\mathbf M} + {\mathbf M}^T \] \end{document} | Symmetrierung | (19) |

Eine antisymmetrische Matrix ist gleich dem Negativen ihrer Transponierten.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[   \begin{pmatrix}     0 & 3 \\     -3 & 0    \end{pmatrix}^T =   - \begin{pmatrix}     0 & 3 \\     -3 & 0    \end{pmatrix} \quad\quad M_{ij}^T = M_{ji} = - M_{ij} \quad\quad {\mathbf M}^T = -{\mathbf M} \] \end{document} | AntisymmetrischeMatrizen | (20) |

Wie kann aus einer beliebigen Matrix analog zur Symmetrierung eine antisymmetrische Matrix erzeugt werden?

#### Inverse Matrizen

Definition:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ {\mathbf M} \cdot {\mathbf M}^{-1} = {\mathbf M}^{-1} \cdot {\mathbf M} = {\mathbf 1} \] \end{document} | InverseMatrix | (21) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Zeige, dass beide Produkte die Einheitsmatrix ergeben!  %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ {\begin{pmatrix}2&5\\1&3\end{pmatrix}}\cdot {\begin{pmatrix}3&-5\\-1&2\end{pmatrix}} \quad\quad {\begin{pmatrix}3&-5\\-1&2\end{pmatrix}}\cdot  {\begin{pmatrix}2&5\\1&3\end{pmatrix}}  \] \end{document} | AufgabeInverseMatrix | (22) |

* Die Inverse der Inversen ist die ursprüngliche Matrix.
* Es gibt Matrizen, die ihre eigenen Inversen sind.

Es gilt:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ ({\mathbf M}^{-1})^{-1} = {\mathbf M} \quad\quad (c {\mathbf M})^{-1} = c^{-1} {\mathbf M}^{-1} \quad\quad \operatorname{det}({\mathbf M}^{-1}) =  \operatorname{det}({\mathbf M})^{-1} \quad\quad ({\mathbf A} \cdot {\mathbf B})^{-1} = {\mathbf B}^{-1} \cdot {\mathbf A}^{-1} \] \end{document} | InverseMatrixRegeln | (23) |

#### Eigenwerte und Eigenvektoren quadratischer Matrizen

x ist ein Spaltenvektor:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ {\mathbf A}\cdot x=\lambda \,x \quad\quad ({\mathbf A} - \lambda\, {\mathbf I}) \cdot x = 0 \] \end{document} | EigenwerteMatrizen | (24) |

Ist ein homogenes lineares Gleichungssystem, lösbar wenn

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ {\det \left({\mathbf A}-\lambda\, {\mathbf I}\right)=0} \] \end{document} | DeterminanteEigenwert | (25) |

Charakteristisches Polynom: seine Nullstellen sind die Eigenwerte. Zu jedem Eigenwert gehört ein Eigenvektor. Ist A eine n x n Matrix, dann gibt es höchstens n Eigenwerte.

Sind Eigenwerte gleich, dann heißen sie (Physik, historisch): entartet. Zu einem k-fachen Eigenwert gehören k Eigenvektoren, die einen k-dimensionalen Unterraum aufspannen (k <= n).

#### Orthogonale (Quadratische) Matrizen

Definition

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ {\mathbf Q}^T \cdot {\mathbf Q} = {\mathbf I} \] \end{document} | OrthogonaleMatrix | (26) |

D.h. automatisch

* Mit Q ist auch ihre Transponierte orthogonal.
* Die Zeilenvektoren sind orthogonal.
* Die Spaltenvektoren sind orthogonal.
* Die Zeilen- und Spaltenvektoren sind auf 1 normiert.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Zeige, dass die 2-dimensonale Drehmatrix all das erfüllt!  %FontSize=11 %TeXFontSize=11 \documentclass{article} \pagestyle{empty} \begin{document} \[ \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \] \end{document}  Orthogonal transformation qtl1.svg | AufgabeOrthogonaleMatrix | (27) |

Weiteres:

* det Q = 1
* Skalarprodukt der transformierten Vektoren = Skalarprodukt der untransformierten Vektoren.
* Eigenwerte sind +1 und/oder -1.
* Spiegelungen sind auch orthogonale Matrizen. Physik: Paritätsoperation spiegelt die Ortskoordinaten.
* Orthogonale Gruppe O(n), ohne Spiegelungen: SO(n). Kommt noch...

#### Transformationen

Die Objekte der Physik sollen Modelle der Wirklichkeit sein. Soll die Wirklichkeit objektiv sein, so erwarten wir, dass sie nicht davon abhängt, welches Koordinatensystem wir wählen: Meter oder Zoll, Sekunden oder Minuten als Zeiteinheit, usw.

In der klassischen Physik glaubt man daran, dass die Gesetze unter diesen Transformationen invariant sein müssen:

* Drehungen
* Spiegelungen
* Translationen x‘ = x + b (→ Ableitungen und Entfernungen, keine absoluten Orte)
* Gleichförmige Bewegungen (Relativitätsprinzip, Galileitransformation) x‘ = x + vt

Für skalare Größen gilt: sie ändern sich dann nicht. Die Temperatur an einem Punkt (Objekt der Wirklichkeit) soll den gleichen Wert haben, egal ob wir direkt darauf schauen oder uns drehen und dann (wieder stillstehend) das Thermometer aus dem Augenwinkel heraus betrachten. Sie ändert sich auch nicht, wenn wir am Thermometer mit konstanter Geschwindigkeit vorbeifahren. Bei beschleunigten Bewegungen können sich die Gesetze jedoch ändern und tun dies auch fast immer, z.B. Corioliskraft, Zentrifugalkraft.

Für vektorielle Größen gilt: sie ändern ihren Betrag nicht, der ja eine skalare Größe ist (s.o.), aber ihre Richtung in Bezug auf das neue Koordinatensystem. Vektoren in der Physik sind nicht irgendwelche Zahlen in Spalten oder Zeilen, sondern n Größen, die sich bei Transformationen wie ein Vektor transformieren, d.h. entweder kovariant oder kontravariant zum Transformationsverhalten der Vektoren, die das Koordinatensystem aufspannen.

Es muss zwischen den Objekten, den Tensoren n-ter Stufe, und ihren Zahlenwerten unterschieden werden. Wenn wir etwas rechnen wollen, brauchen wir immer Zahlen, dazu müssen wir eine Basis von Koordinatenvektoren festsetzen. Ein Zahlentupel eines Vektors sind seine Komponenten bezüglich dieser Basis. Sie sind nicht mit dem Vektor selbst zu verwechseln!

Hat man die Komponenten eines Vektors, so kann eine Drehung oder Spiegelung durch eine Matrix ausgedrückt werden.

TODO Beispiel

Wie transformiert sich ein Tensor 2. Stufe? Ein Tensor T 2. Stufe ordnet jedem Vektor (= Tensor 1. Stufe) einen Vektor zu. Bei einer Transformation soll nun das Skalarprodukt (ein Skalar!) invariant sind.

...

TODO Beispiel, aus Greiner Symmetrien?

## Analysis

Funktionen sind auch nur unendlich dichte Zahlentupel

Distributionen: Delta-Distribution

Funktionen als Vektoren, Beispieldef. Skalarprodukt

#### Funktionen von Matrizen

über Potenzreihe, e hoch Matrix, ln Matrix

Nicht jede F. mehrerer Veränderlicher ein Produkt aber entwickelbar. => Verschränkung

Partielle Ableitungen, e hoch Differentialoperator

Integrale mit Delta-Distribution

Lineare Differentialgleichungen mit Eigenwerten

Nichtlineare versus lineare DGL

## Komplexe Zahlen

Definition, Rechenregeln

Andere Darstellung der Algebra durch Matrizen, Beispiel Wikipedia

* Es geht um die Algebra.

Physik: wir müssen die Imaginärteile immer irgendwie loswerden: Beispiel E-Technik, Skalarprodukt QT

Polardarstellung, Drehung in der komplexen Ebene

Trigonometrische Funktionen und e-Funktion

[Quaternionen und Dirac-Matrizen, Clifford-Algebren]

## Gruppen

Definition

## Vektorräume

# Hilberträume

# Shannonsche Informationstheorie

# Philosophischer Ausflug

# Quantentheorie



* alles über 1 Kamm scheren: Hilbertraum und lineare Operatoren als abstraktes Modell für Funktionen/n-Tupel und lineare Differential- und Matrixoperatoren
* Die aufgrund der Linearität beliebige Zerlegbarkeit (freie Wahl der Basis), z.B. Fouriertransformation
* Eigenwerte linearer Operatoren
* Das Skalarprodukt. Die Zweischichtigkeit: linear und nichtlinear
* Produkträume, offene Quantensysteme, Dichteoperatoren, Verschränkung und Ganzheit
* halbklassisch, Korrespondenzprinzip
* es gibt eine absolute Zeit (passend zu unserer Alltagsvorstellung, erst mal ausreichend für Quantenrechner)
* Schrödingergleichung, Pauligleichung
* Beispiele (Wasserstoffproblem, harmonischer Oszillator)
* Die unitäre Zeitentwicklung: „es geschieht nichts“ (Heisenberg). Integration der Schrödingergleichung.

# Interpretationen der Quantentheorie

* Das Messproblem: seine Dreifaltigkeit und 2/3 Lösung durch Dekohärenztheorie
* Das verbleibende schlimme 1/3: die totlebendige Schrödingerkatze.
* Die Wahrscheinlichkeitsinterpretation (z.B. Stern-Gerlach-Experimente) mit Kollaps der Wellenfunktion
* Wigners Freund, Heisenbergsche Schnitte
* Die Viele-Welten-Interpretation („many minds“)
* [Die „shut up and calculate“ Interpretation]
* Es gibt keine Teilchen, es gibt keine Materiefelder, es gibt Symmetrien, mathematikartige Gesetze, Bewusstsein.

# Quanteninformation

* [Das Problem des Kontinuums mit der Information, die Willkür der Einteilung, absolute Information durch schwarze Löcher?]
* Q-Bit als kleinste sinnvolle Einheit, die Beziehung zwischen Q-Bit und klassischem Bit
* Q-Bit Beispiele (es gibt auch Q-Trits, …)
* Produkträume von Q-Bits und unitäre Zeitentwicklung = Quantenrechner
* In etwa bis zur Hälfte von <https://quantiki.org/wiki/basic-concepts-quantum-computation> oder Matthias Homeister

Literaturverweise und Aufgaben in den einzelnen Kapiteln