

---

# Abwärtsgerichtete Kausalität im quantenmechanischen Messprozess

---

**Top-down causation in the quantum mechanical measurement process**

Bachelor-Thesis von Tobias Haas

Tag der Einreichung:

1. Gutachten: Prof. Dr. Barbara Drossel
2. Gutachten: M. Sc. Julian Geske



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Fachbereich Physik  
Institut für Festkörperphysik  
AG Drossel

Abwärtsgerichtete Kausalität im quantenmechanischen Messprozess  
Top-down causation in the quantum mechanical measurement process

Vorgelegte Bachelor-Thesis von Tobias Haas

1. Gutachten: Prof. Dr. Barbara Drossel
2. Gutachten: M. Sc. Julian Geske

Tag der Einreichung:

---

# Erklärung zur Bachelor-Thesis

Hiermit versichere ich, die vorliegende Bachelor-Thesis ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 8. August 2016

---

(Tobias Haas)

---

---

---

## Zusammenfassung

---

In dieser Arbeit wird der Gedanke einer abwärtsgerichteten Kausalität im quantenmechanischen Messprozess untersucht. Dazu wird zuerst der quantenmechanische Messprozess, aufbauend auf einer kurzen Einführung in die Quantenmechanik, erläutert. Anschließend wird das unweigerlich resultierende Messproblem der Quantenmechanik angesprochen und anhand von gängigen Beispielen diskutiert. Abgerundet wird dies von den bekanntesten Interpretationen der Quantenmechanik, welche genannt und in ein Verhältnis zu den angesprochenen Beispielen gesetzt werden. Im dann folgenden Abschnitt wird der Begriff der Kausalität, sowohl in der Philosophie, als auch in der Physik und insbesondere in der Quantenmechanik, allgemein eingeführt und diskutiert. Daran anschließend wird die abwärtsgerichtete Kausalität definiert und auf die bisherigen Überlegungen zum quantenmechanischen Messprozess angewandt. Dabei soll insbesondere auf die Konsistenz der Terminologie und der gedanklichen Ansätze geachtet werden, damit als Ziel eine konsistente Beschreibung formuliert werden kann.

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Der quantenmechanische Messprozess</b>	<b>5</b>
2.1	Grundlagen der Quantenmechanik	5
2.1.1	Physikalischer Hintergrund	5
2.1.2	Mathematischer Hintergrund	6
2.1.3	Axiome der Quantenmechanik	9
2.2	Der quantenmechanische Messprozess	9
2.3	Das Messproblem der Quantenmechanik	11
2.4	Gedankenexperimente, reale Experimente und Paradoxa	12
2.4.1	Schrödingers Katze	12
2.4.2	Wigners Freund	13
2.4.3	EPR-Argument und Bellsche Ungleichung	14
2.4.4	Welcher-Weg-Information am Doppelspalt	16
<b>3</b>	<b>Interpretationen und Phänomene der Quantenmechanik</b>	<b>18</b>
3.1	Kopenhagener Interpretation	18
3.2	Viele-Welten-Interpretation	19
3.3	Bohmsche Mechanik	21
3.4	Dekohärenz	23
<b>4</b>	<b>Kausalität</b>	<b>26</b>
4.1	Kausalität in der Philosophie	26
4.2	Mathematische Formalisierung von Kausalität	31
4.3	Kausalität in der Physik	32
<b>5</b>	<b>Abwärtsgerichtete Kausalität</b>	<b>36</b>
5.1	Ursprüngliche Definition bei Donald T. Campbell	36
5.2	Ausbau durch George Ellis	37
5.2.1	Kritik an der gewöhnlichen Auffassung von Kausalität in der Physik	37
5.2.2	Definition von Kausalität und Folgerungen	37
5.2.3	Dynamische und undynamische Ursachen	38
5.2.4	Drei Arten von Kausalität zwischen und auf Ebenen	38
5.2.5	Fünf Arten von abwärtsgerichteter Kausalität	40
5.2.6	Beispiel aus der Quantenphysik: Bändermodell	42
5.3	Anwendung von abwärtsgerichteter Kausalität auf den quantenmechanischen Messprozess	42
5.3.1	Abwärtsgerichtete Kausalität in der Physik	42
5.3.2	Abwärtsgerichtete Kausalität im quantenmechanischen Messprozess	43
<b>6</b>	<b>Vorschlag für eine Theorie der absoluten Beobachtung</b>	<b>46</b>
6.1	Problemanalyse	46
6.2	Ansätze für eine Theorie der absoluten Beobachtung	47
6.2.1	Kernidee	47
6.2.2	Definitionen grundlegender Begriffe und ein Postulat	48
6.3	Deutung der Physik	56
6.4	Modaler quantenmechanischer Messprozess	58
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>60</b>

---

## 1 Einleitung und Motivation

---

Die Quantenmechanik ist neben der Allgemeinen Relativitätstheorie einer der beiden Stützpfeiler der modernen Physik und erlaubt die Beschreibung von mikroskopischen Objekten, welche sich der direkten Anschauung entziehen. Und obwohl die experimentellen Befunde ihren Geltungsanspruch jedes mal aufs Neue untermauern, sieht sie sich wie keine andere Theorie heftigsten Diskussionen ausgesetzt. Obgleich ihrer Erfolge ist die Bedeutung ihrer Annahmen und Aussagen daher auf diverse Interpretationen verteilt. Die Lösungsvorschläge zu einer allgemein anerkannten Deutung vermehren sich von selbst und bis auf Weiteres scheint kein Ende in Sicht.

Der Großteil der Physiker findet sich auf der Seite der Kopenhagener Interpretation wieder, welche von zwei Gründungsvätern der Quantenmechanik, Werner Heisenberg [1] und Niels Bohr [2], in den Jahren 1927 und 1928 vorgeschlagen wurde, aber auch Ansätze wie die Viele-Welten-Interpretation von Hugh Everett [3] und die Bohmsche Mechanik von David Bohm [4, 5] werden in der aktuellen Forschungsgemeinde vertreten. Besondere Aufmerksamkeit in der Diskussion genießt der quantenmechanische Messprozess und das Messproblem, welches einen Akt der Willkür in die Naturwissenschaft bringt. Letzteres ist durch das oft zitierte Gedankenexperiment von Erwin Schrödingers Katze [6] berühmt geworden. Erste Annäherungen an die sich ergebende Problematik konnten mit der Dekohärenztheorie, welche auf Heinz-Dieter Zeh [7] zurückgeht und die Wechselwirkung mit der Umgebung mit einschließt, vollzogen werden. Das zweite und dritte Kapitel dieser Arbeit beschäftigen sich daher mit dem quantenmechanischen Messprozess und den zugehörigen Aussagen der gängigsten Interpretationen.

Ausgehend von den Differenzen soll ein modernes Konzept auf den quantenmechanischen Messprozess angewandt und geprüft werden, ob eine Beschreibung in dessen Terminologie möglich ist. Jenes Konzept ist die abwärtsgerichtete Kausalität, welches auf Donald Campbell [8] zurückgeht. Campbell beschrieb abwärtsgerichtete Kausalität in biologischen Systemen und verallgemeinerte diese auf die Naturwissenschaft im Allgemeinen, das Auftauchen in der Physik wurde von George Ellis in mehreren Aufsätzen [9, 10, 11] beschrieben. Diesen Konzepten und deren Anwendung auf den quantenmechanischen Messprozess widmet sich das fünfte Kapitel.

Bevor dies geschehen kann, muss der übergeordnete Begriff der Kausalität diskutiert werden, welcher offenbar philosophischen Überlegungen entspringt. Viele große Denker beschäftigten sich mit Kausalität, die Physik selbst hingegen benutzte den Begriff eher, allerdings ohne ihn dabei sauber zu definieren. Die Einbindung der in der Philosophie üblichen Begriffsdefinition in die physikalische Diskussion um den quantenmechanischen Messprozess stellt daher einen wichtigen Teil dieser Arbeit dar, weshalb sich das vierte Kapitel mit Kausalität in der Philosophie und in der Physik befasst, um zuletzt eine Definition zu finden, welche sich in der Physik als praktikabel und gleichzeitig in der Philosophie als hinreichend genau erweist.

Das Ziel dieser Arbeit, eine konsistente Beschreibung des quantenmechanischen Messprozesses in kausal abwärtsgerichtete gedachten Strukturen, wird im sechsten und letzten Kapitel angegangen. Da sich dies nicht ohne eine umfassende Betrachtung der grundlegenden Begrifflichkeiten, welche über die Quantenmechanik und sogar über die Physik hinausgehen und zu erkenntnistheoretischen Positionen führen, gelingen kann, muss mit Aufarbeitung der Bedeutung der Physik und insbesondere der Quantenmechanik begonnen werden. Dies wird zu einer Abkehr von den vorigen Überlegungen und zu einem Plädoyer für modale statt kausale Konzepte in einer für den Beobachter absoluten Beobachtung führen. Die neuen allgemeinen Konzepte zur Beschreibung physikalischer Vorgänge sollen schlussendlich auf den quantenmechanischen Messprozess angewandt werden, wobei gezeigt werden muss, dass jene die durch abwärtsgerichtete Kausalität entstehenden Inkonsistenzen beheben.

Als letzte einleitende Bemerkung möchte ich den Leser darauf hinweisen, dass die Anfertigung dieser Arbeit von dem Gedanke geleitet wurde sich erst umfangreich und präzise in die Thematik einzuarbeiten, dabei auf eigene Stellungnahme zu verzichten und die repräsentierten Gedanken unverfälscht darzulegen und erst im Anschluss daran eigene Gedanken zu formulieren. Entsprechend sind die ersten fünf Kapitel als Einarbeitung und das sechste und letzte Kapitel als meine persönliche Ansicht zu verstehen. Um dies auch sprachlich strikt zu trennen werde ich erst im sechsten Kapitel in die erste Person wechseln. Obwohl die ersten fünf Kapitel eine Einführung darstellen ist mir deren inhaltliche Breite wichtig, da sie dem Leser die Möglichkeit geben selbst verschiedenste Eindrücke zu gewinnen um fundiert Stellung zu meiner Position beziehen zu können und weil ich selbst dadurch viel Anregung erhielt. Ich bitte den Leser also vor Allem um Geduld, denn das große Ganze wird sich erst zum Schluss ergeben.

## 2 Der quantenmechanische Messprozess

Im zweiten Kapitel werden die zum Verständnis des quantenmechanischen Messprozesses nötigen Grundlagen der Quantenmechanik kurz aufgeführt und erläutert. Darauf aufbauend werden der quantenmechanische Messprozess und das Messproblem vorgestellt, welche anhand von populären Beispielen wie „Schrödingers Katze“ illustriert werden.

### 2.1 Grundlagen der Quantenmechanik

Die Quantenmechanik war nicht nur für das physikalische Weltbild revolutionär, auch ihre mathematische Struktur grenzte sich deutlich von den klassischen Theorien ab. Es ist daher unerlässlich, die weiteren Gedanken auf einem soliden und gleichzeitig überschaubaren mathematischen Fundament aufzubauen. Jenes lässt sich ausgehend von der Abkehr von den Vorstellungen der klassischen Mechanik und unter Verwendung mathematischer Methoden aus der Funktionalanalysis motivieren und mit schließlich fünf Axiomen formulieren. Für eine ausführliche physikalische Einführung sei auf die Literatur [12, 13, 14, 15] und für eine mathematische Einführung auf die Literatur [16] verwiesen.

#### 2.1.1 Physikalischer Hintergrund

##### Aufgabe der klassischen Bahnvorstellung

Experimente wie das von Clinton Davisson und Lester Germer im Jahre 1927 durchgeführte Beugungsexperiment mit Elektronen [17] zeigten erstmals, dass auch Elektronen, welche bisher stets als Teilchen mit fest definierter Bahnkurve angenommen wurden (vgl. Abb. 1 (a)), Wellencharakter aufweisen können, da ein Interferenzmuster beobachtet wurde. Die Eigenschaft, dass jedes materiebehaftete Objekt Wellencharakter besitzen kann, wurde bereits 1924 von Louis de Broglie [18] postuliert und ist als *Welle-Teilchen-Dualismus* bekannt geworden. Das Doppelspaltexperiment mit Elektronen, durchgeführt 1961 von Claus Jönsson [19], verlangte sogar eine völlige Abkehr von der Vorstellung einer Bahnkurve. Sogar mit als Teilchen aufgefasste Elektronen zeigte sich ein Interferenzmuster, welches auch bei geringsten Intensitäten erhalten blieb (vgl. Abschnitt 2.4.4). Dies stellte einen klaren Widerspruch zur klassischen Bahnvorstellung dar.

##### Entwurf der Wellenfunktion

Ausgehend von De Broglies Theorie der Materiewellen formulierte Erwin Schrödinger 1926 die Wellenmechanik [20], in welcher die klassische Teilchenbahn  $\vec{r}(t)$  durch eine im Allgemeinen komplexwertige Wellenfunktion  $\psi(\vec{r}, t)$  ersetzt wurde (vgl. Abb. 1 (b) links). Die physikalische Bedeutung dieser Wellenfunktion  $\psi(\vec{r}, t)$  ist Gegenstand der verschiedenen Interpretationen der Quantenmechanik (vgl. Kapitel 3). Die am weitesten verbreitete Variante, zu finden in der Kopenhagener Interpretation (vgl. Abschnitt 3.1), wurde ebenfalls 1926 von Max Born vorgeschlagen [21]. Born deutete die Wellenfunktion  $\psi(\vec{r}, t)$  probabilistisch, so dass  $|\psi(\vec{r}, t)|^2 d^3r$  die Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen zur Zeit  $t$  in einem Volumenelement  $d^3r$  um den Ort  $\vec{r}$  zu finden, angibt. Gemäß dieser Auffassung entspricht das Amplitudenquadrat der Wellenfunktion einer Wahrscheinlichkeitsdichte  $\rho(\vec{r}, t) = |\psi(\vec{r}, t)|^2$  (vgl. Abb. 1 (b) rechts).

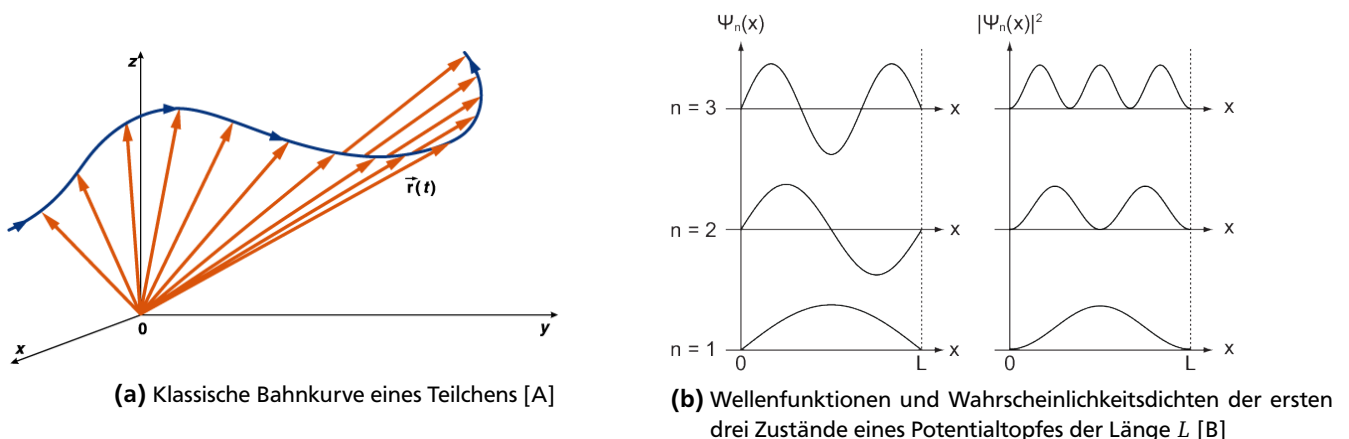


Abbildung 1: Vergleich zwischen klassischer Bahnkurve (a) und Wellenfunktion bzw. Wahrscheinlichkeitsdichte (b)

##### Schrödinger-Gleichung

Zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Wellenfunktion postulierte Schrödinger in seiner Arbeit die nach ihm benannte Schrödinger-Gleichung [15, S. 22]

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) = H\psi(\vec{r}, t), \text{ mit } H = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V. \quad (1)$$

### Von Observablen zu Operatoren

Dabei werden den Observablen der klassischen Mechanik Operatoren zugeordnet, welche konventionell mit einem Hut versehen werden. Diese Zuordnung ist motiviert durch das von Niels Bohr geprägte *Korrespondenzprinzip der Quantenmechanik*, welches die physikalischen Größen der Quantenmechanik mit denen der klassischen Mechanik verknüpft [Bohr]. Als Beispiele seien im Folgenden die Analogien für Energie, Impuls und Ort angegeben [12, S. 22].

1.  $E \rightarrow \hat{E} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$
2.  $\vec{p} \rightarrow \hat{\vec{p}} = -i\hbar \vec{\nabla}$
3.  $\vec{r} \rightarrow \hat{\vec{r}} = \vec{r}$

### Zeitunabhängige Schrödingergleichung

Für zeitunabhängige Potentiale  $\hat{V} \neq \hat{V}(t)$  lässt sich die Schrödingergleichung (1) mittels eines Separationsansatzes  $\psi(\vec{r}, t) = \Theta(t) \cdot \phi(\vec{r})$  in die zeitunabhängige Schrödingergleichung

$$\hat{H}\phi(\vec{r}) = E\phi(\vec{r}) \quad (2)$$

umschreiben, wobei die Zeitabhängigkeit der Lösung

$$\Theta(t) = \Theta_0 \cdot e^{-\frac{i}{\hbar}Et} \quad (3)$$

genügt [12, S. 33]. Gleichung (2) entspricht einem Eigenwertproblem (vgl. Abschnitt 2.1.2), dessen problemorientierte Lösung einer der hauptsächlichen Gegenstände der Quantenmechanik ist.

### Eigenwerte und Eigenfunktionen

Weitere physikalische Relevanz besitzen die Eigenwerte und Eigenfunktionen eines Operators. Die in einem Experiment möglichen Messwerte einer beliebigen Observablen  $A$  sind durch die Eigenwerte  $a_n$  des zugehörigen Operators  $\hat{A}$  gegeben. Den Eigenwerten  $a_n$  sind außerdem Eigenfunktionen  $\Psi_n$  zugeordnet, welche den Zustand des Systems nach Messung des Messwerts  $a_n$  charakterisieren. Um eine Vorhersage über den zu erwartenden Messwert treffen zu können, wird der Erwartungswert  $\langle \hat{A} \rangle$ , also der Mittelwert einer als zufällig angenommenen Messgröße nach beliebig vielen Messungen, berechnet. Die Unsicherheit  $\Delta A$  in einer Messung wird über die Schwankung einer Observablen ausgedrückt, dabei gilt  $(\Delta A)^2 = \langle \hat{A}^2 \rangle - \langle \hat{A} \rangle^2$  [15, S. 137-141].

### Heisenbergsche Unschärferelation

Die Analyse der Unsicherheit einer Messgröße verhalf Werner Heisenberg 1927 zu der nach ihm benannten *Heisenbergschen Unschärferelation* [1]. In ihrer ursprünglichen Formulierung besagt sie, dass eine Messung des Ortes  $x$  immer mit einer Störung der Messung des Impulses  $p$  verbunden ist und umgekehrt. Somit lassen sich beide Observablen nicht mit beliebig kleinen Unsicherheiten  $\Delta x$  und  $\Delta p$  messen, was Heisenberg qualitativ mit der Relation

$$\Delta x \cdot \Delta p \sim h \quad (4)$$

abschätzte. Im späteren Verlauf wird diese Relation in einem strikten mathematischen Sinne abgeleitet und auf beliebige Observablen verallgemeinert (vgl. Abschnitt 2.1.2). Parallel dazu formulierte Niels Bohr das *Komplementaritätsprinzip*, nach dem es möglich ist, dass zwei verschiedene Beschreibungen einer Beobachtung einander gleichzeitig ausschließen und ergänzen, dem Wort gemäß komplementär zueinander sind [22]. Daraus ableitbare Beispiele sind der Welle-Teilchen-Dualismus und die Heisenbergsche Unschärferelation.

---

## 2.1.2 Mathematischer Hintergrund

---

Die erste mathematische Formulierung der Quantenmechanik fand nicht durch 1926 Schrödinger mit seiner Wellenmechanik, sondern bereits 1925 in drei Arbeiten von Heisenberg, Born und Pascual Jordan mit der Matrizenmechanik ihren Ursprung [23, 24, 25]. Allerdings konnte Schrödinger im selben Jahr zu seiner Veröffentlichung die Äquivalenz der beiden Ansätze beweisen [26]. Im Jahr 1930 veröffentlichte Paul Dirac sein Lehrbuch zur Quantenmechanik, in welchem erstmals Elemente der Theorie linearer Operatoren Verwendung fanden und die bis heute gebräuchliche Bra-Ket-Notation eingeführt wurde [27]. Weiterhin abstrahierte Dirac die Wellenfunktion  $\psi(\vec{r}, t)$  zum Zustand  $|\psi\rangle$ . Zwei Jahre später konnte John von Neumann die bisherigen Arbeiten im Rahmen einer vollständigen mathematischen Beschreibung zusammenfassen, wozu er eine Theorie mit linearen Operatoren in Hilberträumen formulierte [16]. Von diesen Arbeiten ausgehend wird im Folgenden ein kurzer Überblick über die mathematischen Hintergründe der Quantenmechanik gegeben.



## Hilbertraum

Jedes System ist in der Quantenmechanik durch Zustände charakterisiert. Zustände werden als Vektoren  $x \in H$  in einem separablen Hilbertraum  $H$  beschrieben. Ein Hilbertraum  $H$  ist im Allgemeinen ein Vektorraum über  $\mathbb{K} = \mathbb{C}$ , welcher mit einem Skalarprodukt  $\langle | \rangle : H \times H \rightarrow \mathbb{C}$  versehen ist, wobei zusätzlich jede Cauchy-Folge konvergiert [28, S. 5]. Des Weiteren heißt ein Hilbertraum  $H$  separabel, wenn eine höchstens abzählbare Teilmenge existiert, die in  $H$  dicht liegt [28, S. 10].

## Zustände als Zustandsvektoren und Bra-Ket-Notation

Ein quantenmechanischer Zustand wird mit einem abstrakten Zustandsvektor  $|\psi\rangle \in H$ , einem sogenannten „ket-Vektor“, beschrieben [12, S. 167]. Auf einen ket-Vektor  $|\psi_1\rangle$  kann ein „bra-Vektor“  $\langle\psi_2|$  als ein lineares Funktional wirken und jenen auf eine komplexe Zahl  $c \in \mathbb{C}$  abbilden, also gilt  $\langle\psi_1|\psi_2\rangle = c$  analog zu einem Skalarprodukt. Entsprechend ist der Vektorraum aller bra-Vektoren dual zum Vektorraum aller ket-Vektoren [12, S. 168-169]. Der Vorteil dieser Beschreibung liegt darin, dass die Wellenfunktion, welche von einer Basis abhängig ist (z.B. Ortswellenfunktion oder Impulswellenfunktion), durch einen abstrakten und von einer Basis unabhängigen Zustand ersetzt wird.

## Zustände und Wellenfunktion

Ein Zustand kann in eine Wellenfunktion übersetzt werden, indem er auf eine Basis projiziert wird [12, S. 169]. So gilt beispielsweise für die Ortswellenfunktion und die Impulswellenfunktion

$$\psi(x) \equiv \langle x|\psi\rangle \quad \text{und} \quad (5)$$

$$\psi(p) \equiv \langle p|\psi\rangle. \quad (6)$$

## Quantenmechanische Operatoren

Ein quantenmechanischer Operator  $\hat{A}$  ist eine lineare Abbildung  $H \rightarrow H : |\psi\rangle \rightarrow \hat{A}|\psi\rangle$ , welche Zustände auf Zustände abbildet [12, ebd.]. Für stationäre Probleme entsprechend Gleichung (2) ergibt sich dann ein Eigenwertproblem der Form

$$\hat{A}|\psi_n\rangle = a_n|\psi_n\rangle. \quad (7)$$

## Eigenwerte, Eigenfunktionen und Erwartungswerte

Ist ein Operator  $\hat{A}$  einer Observablen  $A$  zugeordnet, so ist er hermitesch bzw. selbstadjungiert [15, S. 126], d.h. es gilt  $\hat{A} = \hat{A}^\dagger$ , und er hat reelle Eigenwerte  $a_n$  [15, S. 131]. Das Spektrum eines Operators, also die Menge aller Eigenwerte, kann diskret oder kontinuierlich sein. Beispielsweise ist das Spektrum des Ortsoperators  $\hat{x}$  kontinuierlich, da sich ein freies Teilchen an einem beliebigen Ort aufhalten kann, und das Spektrum des Hamilton-Operators  $\hat{H}$  für das Wasserstoffatom diskret [15, S. 130], da nur bestimmte Energieniveaus eingenommen werden können. Weiterhin bilden die Eigenzustände  $|\psi_n\rangle$  eine orthogonale und vollständige Basis  $\{|\psi_n\rangle\}$  von  $H$  mit  $\langle\psi_n|\psi_m\rangle = \delta_{nm}$  [15, S. 131-132]. Folglich lässt sich ein Zustand  $|\psi\rangle$  in eine Basis von Eigenzuständen  $\{|\psi_n\rangle\}$  entwickeln, d.h. [15, S. 137]

$$|\psi\rangle = \sum_n c_n |\psi_n\rangle. \quad (8)$$

Die Koeffizienten  $c_n$  in Gleichung (8) sind gegeben durch  $c_n = \langle\psi_n|\psi\rangle$ , so dass deren Betragsquadrat  $|c_n|^2$  die Wahrscheinlichkeit angibt, dass sich ein System im Zustand  $|\psi\rangle$  nach einer Messung im Zustand  $|\psi_n\rangle$  befindet [15, ebd.]. Damit folgt zum einen, dass  $c_n^* = \langle\psi|\psi_n\rangle$  gilt und zum anderen, dass sich der Operator  $\hat{A}$  in der Basis der orthogonalen Eigenfunktionen  $\{|\psi_n\rangle\}$  schreiben lässt als

$$\hat{A} = \sum_n |\psi_n\rangle a_n \langle\psi_n|, \quad (9)$$

was als spektrale Darstellung bezeichnet wird [12, S. 170]. Mit diesen Relationen folgt für den Erwartungswert eines Operators  $\hat{A}$  [15, S. 138]

$$\langle\hat{A}\rangle = \langle\psi|\hat{A}|\psi\rangle = \sum_n \langle\psi|\psi_n\rangle a_n \langle\psi_n|\psi\rangle = \sum_n c_n^* a_n c_n = \sum_n |c_n|^2 a_n. \quad (10)$$

Der Erwartungswert entspricht dem statistischen Erwartungswert, also einer mit Wahrscheinlichkeiten gewichtete Linearkombination von möglichen Messwerten. Aus Gleichung (10) folgt außerdem, dass eine Messung an einem System, welches sich vor der Messung in einem Eigenzustand  $|\psi_n\rangle$  befand, mit Sicherheit den Messwert  $a_n$  ergibt.

### Vollständigkeitsrelation

Für Rechnungen relevant ist die Vollständigkeitsrelation, welche für eine orthogonale Basis von Zuständen  $\{|\psi_n\rangle\}$  mit  $\langle\psi_n|\psi_m\rangle = \delta_{nm}$  gilt, so dass für die Gruppe der Operatoren das 1-Element gegeben ist durch [12, S. 170]

$$\hat{1} = \sum_n |\psi_n\rangle \langle\psi_n|. \quad (11)$$

### Kommutator und simultane Eigenfunktionen

Analog zur Poisson-Klammer, welche in der klassischen Mechanik bei den Hamiltonschen Bewegungsgleichungen Verwendung findet, wird in der Quantenmechanik der Kommutator zweier Operatoren  $\hat{A}$  und  $\hat{B}$  gleicher Dimension definiert als [15, S. 142]

$$[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A} \cdot \hat{B} - \hat{B} \cdot \hat{A}. \quad (12)$$

Dies ist nützlich, um die Eigenfunktionen von Operatoren vergleichen zu können. Dazu wird der Begriff der simultanen Eigenfunktion eingeführt. Zwei Observablen  $\hat{A}$  und  $\hat{B}$  besitzen simultane Eigenfunktionen  $|\psi_n\rangle$  mit

$$\hat{A}|\psi_n\rangle = a_n |\psi_n\rangle \quad \text{und} \quad \hat{B}|\psi_n\rangle = b_n |\psi_n\rangle \quad (13)$$

genau dann, wenn ihr Kommutator verschwindet, also  $[\hat{A}, \hat{B}] = 0$  gilt [12, S. 104]. Verschwindet der Kommutator zweier Observablen nicht, so heißen sie komplementär. Daraus folgt unter Anderem, dass der Erwartungswert eines zeitunabhängigen Operators  $\hat{A}$ , welcher mit dem Hamilton-Operator vertauscht, d.h.  $[\hat{A}, \hat{H}] = 0$ , ebenfalls zeitunabhängig ist.

### Verallgemeinerte Unschärferelation

Mit Hilfe des Kommutators lässt sich für zwei beliebige Observablen  $A, B$  mit zugehörigen Operatoren  $\hat{A}, \hat{B}$  die verallgemeinerte Unschärferelation aufstellen als [15, S. 142]

$$(\Delta A)^2 (\Delta B)^2 \geq \frac{1}{4} | \langle [\hat{A}, \hat{B}] \rangle |^2. \quad (14)$$

Nach den Gleichungen (13) und (14) sind zwei Observablen genau dann beliebig genau gleichzeitig messbar, wenn der Kommutator der zugehörigen Operatoren verschwindet. Dies wiederum ist genau dann der Fall, wenn die beiden Observablen simultane Eigenfunktionen besitzen.

Für die beiden Observablen Ort und Impuls folgt im eindimensionalen Fall in Gleichung (14) die bekannte Heisenbergsche Unschärferelation in quantitativer Form

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (15)$$

### Zustand eines zusammengesetzten Systems

Setzt sich ein System aus mehreren Teilsystemen zusammen kann aus den Zuständen der Teilsysteme auf den Zustand des Gesamtsystems geschlossen werden. Sei  $\{|\psi_n\rangle_1\}$  die Basis aus Eigenzuständen des ersten Hilbertraums  $\mathbb{H}_1$  des ersten Systems, während  $\{|\psi_n\rangle_2\}$  die Basis aus Eigenzuständen des anderen Hilbertraums  $\mathbb{H}_2$  des zweiten Systems ist. Der Gesamtzustand ist dann ein Produktzustand aus dem Hilbertraum  $\mathbb{H}_1 \otimes \mathbb{H}_2$  mit [14, S. 769]

$$|\psi\rangle = \sum_{n,i} c_{n,i} |\psi_n\rangle_1 \otimes |\psi_n\rangle_2. \quad (16)$$

Ist der Gesamtzustand nicht verschränkt, so lässt sich Gleichung (16) mit den Elementen  $c_{n,i} = a_n b_i$  der Koeffizientenmatrix separieren zu [14, ebd.]

$$|\psi\rangle = \left( \sum_n |a_n\rangle |\psi_n\rangle_1 \right) \otimes \left( \sum_i |b_i\rangle |\psi_n\rangle_2 \right), \quad (17)$$

andernfalls ist der Gesamtzustand verschränkt und nicht als Linearkombination aus Produktzuständen darstellbar.

---

### 2.1.3 Axiome der Quantenmechanik

---

Die Überlegungen aus den beiden vorherigen Abschnitten lassen sich mathematisch rigoros mit den folgenden fünf Axiomen der Quantenmechanik formulieren [12, S. 172]

1. Der Zustand eines Systems wird durch den Zustandsvektor  $|\psi\rangle$  beschrieben.
2. Die Observable  $A$  wird durch einen hermiteschen Operator  $\hat{A}$  dargestellt, wobei Funktionen von Observablen durch die entsprechenden Funktionen der Operatoren dargestellt werden.
3. Der Erwartungswert der Observablen  $A$  mit zugehörigem Operator  $\hat{A}$  ist im Zustand  $|\psi\rangle$  gegeben durch

$$\langle \hat{A} \rangle = \langle \psi | \hat{A} | \psi \rangle. \quad (18)$$

4. Die Zeitentwicklung eines Zustands  $|\psi\rangle$  ist durch die Schrödinger-Gleichung bestimmt

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle = \hat{H} |\psi\rangle, \text{ mit } \hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + \hat{V}. \quad (19)$$

5. Wenn bei der Messung von  $\hat{A}$  der Wert  $a_n$  gemessen wurde, geht das System in den Zustand  $|\psi_n\rangle$  über.

---

## 2.2 Der quantenmechanische Messprozess

---

### Grundlegende Überlegungen

In der Quantenmechanik wird der Messprozess in drei Instanzen unterteilt [13, S.187]. Diese sind

1. das System,
2. das Messgerät und
3. der Beobachter.

Eine Messung ist dabei das Produkt von Wechselwirkungen zwischen diesen Instanzen, so dass jede Interaktion unweigerlich eine Modifikation der beteiligten Instanzen mit sich führt. Im Rahmen der klassischen Physik wird angenommen, dass etwaige Modifikationen beliebig vermindert werden können und damit vernachlässigbar sind, weshalb eine Interaktion lediglich einen ersatzlosen Transfer an Informationen bezüglich Zuständen darstellt. In der Quantenmechanik hingegen können die Modifikationen zwischen System und Messgerät nicht mehr vernachlässigt werden, nur die Interaktion zwischen Messgerät und Beobachter wird weiterhin als einfacher Transfer aufgefasst [16, S. 224]. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass ein System während einer Messung durch ein Messgerät durch eben jenes gestört wird. Dies macht sich besonders dann bemerkbar, wenn eine Messung den Zustand des System so verändert, dass das Messresultat nicht mehr unabhängig von der Messung existiert. Des Weiteren ergibt sich zwangsläufig eine Beeinflussung durch ein Messgerät, wenn mehrere Messungen von verschiedenen Observablen verschiedene Ergebnisse je nach Reihenfolge der Messungen ergeben. Letzteres drückt sich schon in der Formulierung der allgemeinen Unschärferelation (Gleichung (14)) aus. Die Störung des System durch das Messgerät macht auf das Verhältnis der räumlichen Größenordnungen aufmerksam. Wohingegen das Messgerät ein makroskopisches Objekt, beispielsweise eine Digitalwaage, ist, können Systeme mikroskopischer Natur sein, wie zum Beispiel das Wasserstoffatom. Folglich ist der Messprozess eine Schnittstelle zwischen Begriffen der klassischen Physik beziehungsweise Vorstellungen der Alltagserfahrung (makroskopisches Messgerät) zur Quantenmechanik (mikroskopisches System) entsprechend dem Bohrschen Komplementaritätsprinzip.

### Heisenberg-Messprozess

Werner Heisenberg differenzierte den quantenmechanischen Messprozess gemäß drei aufeinander folgenden Schritten [29].

1. Präparation: Das Messobjekt, bestehend aus einer Grundgesamtheit an Teilchen, wird in einen Zustand  $|\psi\rangle$  versetzt, welcher durch eine Wellenfunktion  $\psi$  repräsentiert wird.
2. Wechselwirkung: Das System wechselwirkt mit dem Messgerät. Dieser Prozess wird durch eine zeitliche Entwicklung beschrieben.
3. Registrierung: Im Anschluss an die zeitliche Entwicklung wird das Messresultat bestimmt.

Diese Dreiteilung des Messprozesses war nicht unumstritten und mathematisch nicht rigoros formuliert. Beispielsweise kritisierte Willis Lamb die Uneindeutigkeit des Begriffs der Präparation [30], weswegen der Heisenberg-Messprozess lediglich als Orientierung und Vokabular für die zukünftige Beschreibung dienen soll.

### Der Heisenbergsche Schnitt

Um eine Grenze zwischen den Anwendungsbereichen der klassischen Mechanik und der Quantenmechanik zu ziehen, führte Heisenberg den nach ihm benannten Heisenbergschen Schnitt ein [31, S. 411]. Auf der einen Seite des Schnittes stehen alle Objekte, welche im Rahmen der Quantenmechanik, also mit der Schrödingergleichung beschrieben werden. Auf der anderen Seite stehen alle anderen Objekte, welche dann im Rahmen der klassischen Mechanik aufgefasst werden. Der Heisenbergsche Schnitt verknüpft demnach die beiden Beschreibungen, da keine von ihnen ignoriert werden kann. Ein mikroskopisches System muss mit der Quantenmechanik beschrieben werden, wie auch die vom Beobachter festgestellten Messresultate zweifelsfrei klassischer Natur sind. Es erfolgt somit eine Einteilung in das Beobachtete und das Beobachtende oder das Messobjekt und das Messgerät. Heisenberg betont jedoch, dass die Position des Schnitts in der untrennbaren Kette frei wählbar ist, solange sie im Falle eines verschränkten Systems nicht jenes in seine Teile separiert [31, S. 413]. Offenbar ist die Position des Heisenbergschen Schnitts damit auch der Ort der Zustandsreduktion beziehungsweise des Kollapses der Wellenfunktion. Da dies einer der Hauptgründe für die Interpretationsvielfalt der Quantenmechanik ist, stellt die Position des Heisenbergschen Schnitts ein Unterscheidungskriterium für jene dar.

### Von Neumann-Messprozess

Die erste mathematische Beschreibung des quantenmechanischen Messprozesses lieferte John von Neumann in seinem Lehrbuch zur Quantenmechanik von 1932 im fünften und sechsten Kapitel [16, S. 184-237]. Da nach seiner Ansicht der Heisenbergsche Schnitt zwischen dem Beobachter und der Vereinigung aus System und Messgerät gezogen werden kann, muss die Quantenmechanik dazu in der Lage sein, Letztere zu beschreiben [16, S. 224-225].

Dem Gedanken des Heisenberg-Messprozesses folgend beginnt der von Neumann-Messprozess mit der Präparation, welche den quantenmechanischen Zustand des System spezifiziert. Der Zustand des Systems ist durch eine physikalische Größe  $A$  gegeben, welcher der Operator  $\hat{A}$  mit diskreten (wahlweise auch kontinuierlichen) Eigenwerten  $a_n$  zugeordnet ist. Entsprechend bilden die Eigenfunktionen  $\{|\psi_n\rangle\}$  eine orthonormale Basis des zugehörigen Hilbertraums  $\mathbb{H}_A$ , so dass jeder beliebige Zustand  $|\psi\rangle$  des Systems in der Basis

$$|\psi\rangle = \sum_n c_n |\psi_n\rangle \quad (20)$$

dargestellt werden kann. Dabei sind  $c_n = \langle\psi_n|\psi\rangle$  die Komponenten des Zustandsvektors und  $|c_n|^2 = |\langle\psi_n|\psi\rangle|^2$  die Wahrscheinlichkeiten das System nach der Messung in den Zuständen  $|\psi_n\rangle$  anzutreffen.

Auf die Präparation folgt die Wechselwirkung zwischen System und Messgerät. Wie von von Neumann gefordert wird auch das Messgerät im Rahmen der Quantenmechanik beschrieben. Folglich weist das Messgerät Zustände  $|M_n\rangle$  auf, welche den Zeigerstellungen  $n$  des Messgeräts entsprechen und den Zuständen  $|\psi_n\rangle$  des Systems zugeordnet sind. Dabei befindet sich das Messgerät nach der Wechselwirkung mit dem System im Zustand  $|M_n\rangle$ , wenn sich das System vor der Messung im Zustand  $|\psi_n\rangle$  befand. Hierbei sei angemerkt, dass von Neumann dies als *ideale Messung* bezeichnete, da die Wechselwirkung mit dem Messgerät den Zustand des Systems nicht beeinflusst. Vor der Wechselwirkung mit dem System befindet sich das Messgerät immer im Initialzustand  $|M_0\rangle$ , welcher angibt, dass noch keine Messung stattgefunden hat. Ebenfalls existiert wieder eine orthonormale Basis aus Eigenfunktionen  $\{|M_n\rangle\}$  im zugehörigen Hilbertraum  $\mathbb{H}_M$ . Der Zustand des Gesamtsystems aus System und Messgerät wird dann als

$$|\psi_n\rangle \otimes |M_n\rangle \equiv |\psi_n\rangle |M_n\rangle \quad (21)$$

geschrieben (vgl. Abschnitt 2.1.2), wobei das Tensorprodukt der Übersichtlichkeit halber weggelassen wird. Entsprechend diesen Überlegungen lässt sich die Wechselwirkung nach dem in Tab. 1 gezeigten Schema darstellen.

Präparation	Wechselwirkung	Registrierung
$ \psi_n\rangle  M_0\rangle$	$\xrightarrow{t}$	$ \psi_n\rangle  M_n\rangle$

**Tabelle 1:** Schreibweise im von Neumann-Messprozess

### 2.3 Das Messproblem der Quantenmechanik

Der quantenmechanische Messprozess weist eine Inkonsistenz auf, die als *Messproblem der Quantenmechanik* bekannt geworden ist. Um dies zu verdeutlichen wird ein System mit den Eigenzuständen  $|\psi_1\rangle$  und  $|\psi_2\rangle$  und ein Messgerät mit Initialzustand  $|M_0\rangle$ , in welchem noch kein Messwert angezeigt wird, und Messzuständen  $|M_1\rangle$  und  $|M_2\rangle$  betrachtet.

#### System im Eigenzustand

Begonnen wird damit, dass das System in einem Eigenzustand präpariert ist und sich das Messgerät in einem Initialzustand befindet. Dabei werden zwei mögliche Fälle unterschieden. Im ersten Fall ist das System im Eigenzustand  $|\psi_1\rangle$  präpariert, das Messgerät befindet sich im Initialzustand  $|M_0\rangle$ . Anschließend wechselwirken System und Messgerät über eine Zeitdauer  $t$ . Bei der Registrierung befindet sich das System nach wie vor im Eigenzustand  $|\psi_1\rangle$  (vgl. Abschnitt 2.1.2), das Messgerät jedoch im Zustand  $|M_1\rangle$ , da es jetzt einen Messwert anzeigt (vgl. Tab. 1). Analog gestaltet sich der zweite Fall. Wenn das System im Zustand  $|\psi_2\rangle$  präpariert ist, dann befindet sich das Messgerät bei der Registrierung im Zustand  $|M_2\rangle$  (vgl. Tab. 1). Die beiden möglichen Messprozesse sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Präparation	Wechselwirkung	Registrierung
$ \psi_1\rangle  M_0\rangle$	$\xrightarrow{t}$	$ \psi_1\rangle  M_1\rangle$
$ \psi_2\rangle  M_0\rangle$	$\xrightarrow{t}$	$ \psi_2\rangle  M_2\rangle$

**Tabelle 2:** Messprozesse für ein System präpariert in den Eigenzuständen  $|\psi_1\rangle$  und  $|\psi_2\rangle$

#### System in Superposition aus Eigenzuständen

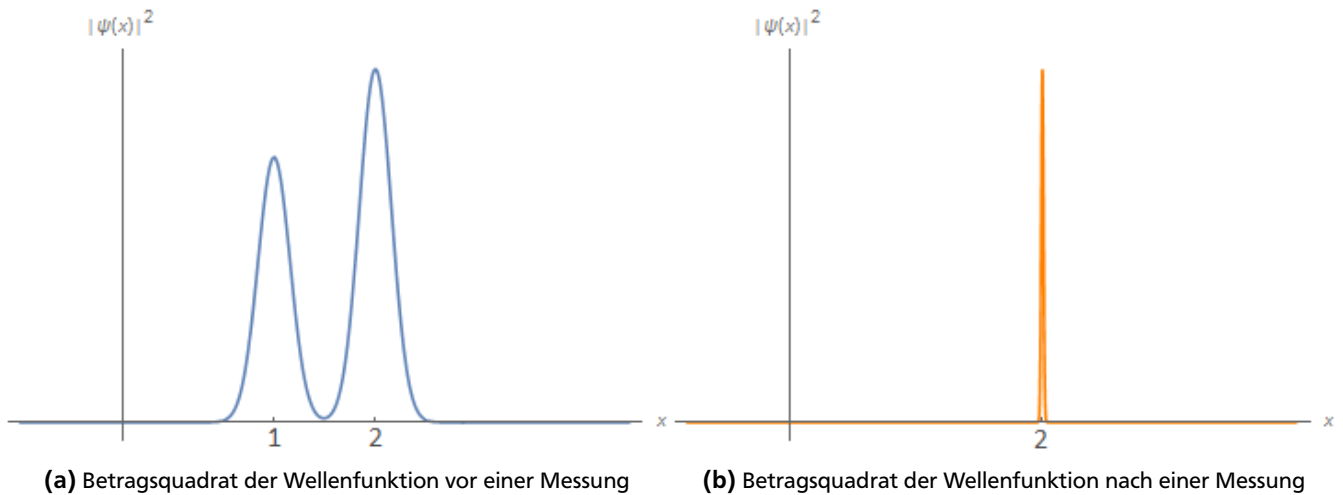
Als nächstes ist das System nicht in einem Eigenzustand, sondern in einer Superposition aus Eigenzuständen  $c_1 |\psi_1\rangle + c_2 |\psi_2\rangle$  präpariert. Das Messgerät befindet sich wieder im Initialzustand  $|M_0\rangle$ . Nach der Wechselwirkung über eine Zeitdauer  $t$  wird am Messgerät der Messwert registriert. Mit den Relationen aus Tab. 1 berechnet sich der Zustand zu  $c_1 |\psi_1\rangle |M_1\rangle + c_2 |\psi_2\rangle |M_2\rangle$ , wobei jeder Eigenzustand des Systems mit einem möglichen Zustand des Messgeräts verknüpft ist. Folglich wird die Superposition des Systems vor der Messung auf das Messgerät bei der Registrierung transformiert. Allerdings ist nach der Registrierung, also beim Ablesen des Messwerts, nur einer der beiden Zustände  $|M_1\rangle$  oder  $|M_2\rangle$  tatsächlich realisiert worden, da sich das Messgerät nur in einem dieser beiden Zustände befinden kann. Dieses Dilemma ist in Tab. 3 zum Ausdruck gebracht worden.

Präparation	Wechselwirkung	Zustand aus SG	Registrierung
$(c_1  \psi_1\rangle + c_2  \psi_2\rangle)  M_0\rangle$	$\xrightarrow{t}$	$c_1  \psi_1\rangle  M_1\rangle + c_2  \psi_2\rangle  M_2\rangle$	$ \psi_n\rangle  M_n\rangle, n = 1, 2$

**Tabelle 3:** Messprozess für ein System präpariert in einer Superposition von Eigenzuständen  $c_1 |\psi_1\rangle + c_2 |\psi_2\rangle$

#### Zustandsreduktion und Kollaps der Wellenfunktion

Der Übergang von einer Superposition aus Eigenzuständen zu einem tatsächlich gemessenen Eigenzustand wird als Zustandsreduktion und speziell in der Quantenmechanik als *Kollaps der Wellenfunktion* [15, S. 25] bezeichnet, welcher von von Neumann als Postulat eingearbeitet wurde. Diese Formulierung erscheint vor allem unter dem Aspekt gerechtfertigt, dass die Zustandsreduktion instantan und damit die Änderung der Wellenfunktion unstetig stattfindet [16, S. 222]. Dies kann an einem anderen Beispiel eingesehen werden. Gegeben ist ein Teilchen, welches durch eine Ortswellenfunktion  $\psi(x)$  charakterisiert ist. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens wird durch das Betragsquadrat des Teilchens angegeben (vgl. Abschnitt 2.1.1). Vor einer Messung gibt es zwei Orte  $x = 1$  und  $x = 2$ , wobei es wahrscheinlicher ist, dass sich das Teilchen um den Ort  $x = 2$  als um den Ort  $x = 1$  aufhält. Weiterhin ist es unwahrscheinlich, dass sich das Teilchen um die Mitte oder außerhalb dieser beiden Orten aufhält. Eine graphische Darstellung dieser Situation ist in Abb. 2 (a) gegeben. Nun wird der Ort des Teilchens gemessen. Das Teilchen wird bei  $x = 2$  lokalisiert, wodurch sich seine Wellenfunktion instantan verändert. Da das Teilchen jetzt mit Sicherheit am Ort  $x = 2$  und *nirgendwo anders* zu finden ist, ist seine neue Wellenfunktion durch eine Delta-Funktion an der Stelle  $x = 2$ , also  $\psi(x) = \delta(x - 2)$ , gegeben, was in Abb. 2 (b) angedeutet ist. Es sei angemerkt, dass sich die Fläche unter beiden Kurven zu 1 ergeben muss, da sie der Summe aller Aufenthaltswahrscheinlichkeiten entspricht, weshalb sich die Skalierungen der Ordinaten unterscheiden.



**Abbildung 2:** Vergleich zwischen dem Betragsquadrat der Wellenfunktion vor (a) und nach (b) einer Messung

## 2.4 Gedankenexperimente, reale Experimente und Paradoxa

Das Messproblem ist einer der Hauptaspekte, weswegen die Quantenmechanik im Gegensatz zu klassischen Theorien wie der klassischen Mechanik ihrer Begründungslast nicht gerecht zu werden scheint. Unweigerlich ergaben sich mehrere gedankliche Ansätze um den unintuitiven Herangehensweisen eine Daseinsberechtigung zu verleihen, welche als die *Interpretationen der Quantenmechanik* (vgl. Kapitel 3) bezeichnet werden. Bevor einige davon vorgestellt werden können, werden einige Gedankenexperimente, reale Experimente und Paradoxa diskutiert, welche im Findungsprozess dieser Interpretationen eine gewichtige Rolle gespielt haben. Ausgehend vom populärsten Beispiel, dem Gedankenexperiment Schrödingers Katze, wird jenes zu Wigners Freund erweitert. Anschließend wird mit dem EPR-Paradoxon und der damit verknüpften Bellschen Ungleichung die Rolle des absoluten Zufalls in einer quantenmechanischen Messung untersucht. Zum Abschluss wird das Doppelspaltexperiment bezüglich der Welcher-Weg-Information vorgestellt, wobei die besondere Rolle des eingreifenden Beobachters zum Vorschein kommt.

### 2.4.1 Schrödingers Katze

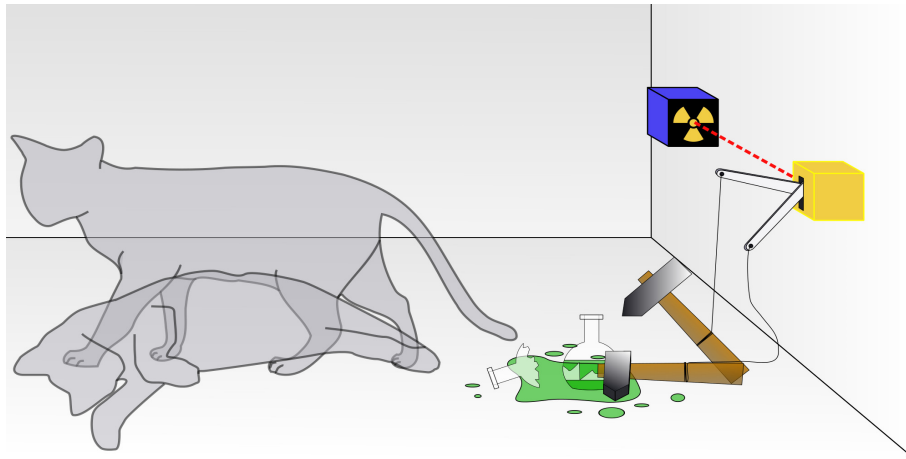
Das Gedankenexperiment Schrödingers Katze wurde 1935 von Erwin Schrödinger im Rahmen einer Arbeit, in welcher er Stellung zu gegenwärtigen Interpretationsansätzen und Gedankenexperimenten wie der Kopenhagener Interpretation (vgl. Abschnitt 3.1) und dem EPR-Paradoxon (vgl. Abschnitt 2.4.3) nimmt, veröffentlicht [6]. Es ist ein drastisches Beispiel für die Konsequenzen des Messproblems, indem es quantenmechanische Vorhersagen auf mikroskopischer Ebene (Zerfall eines radioaktiven Atoms) auf die makroskopische Ebene (das Ableben einer Katze) überträgt. Schrödinger führt dazu aus [6, S. 811]:

„Man kann auch ganz burleske Fälle konstruieren. Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Höllenmaschine (die man gegen den direkten Zugriff der Katze sichern muß): In einem Geigerschen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, so wenig, daß im Laufe einer Stunde vielleicht eines von den Atomen zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines; geschieht es, so spricht das Zählrohr an und betätigt über ein Relais ein Hämmerchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert. Hat man dieses ganze System eine Stunde lang sich selbst überlassen, so wird man sich sagen, daß die Katze noch lebt, wenn inzwischen kein Atom zerfallen ist. Der erste Atomzerfall würde sie vergiften haben. Die Psi-Funktion des ganzen Systems würde das so zum Ausdruck bringen, daß in ihr die lebende und die tote Katze (s.v.v.) zu gleichen Teilen gemischt oder verschmiert sind.“

Eine schematische Skizze des Gedankenexperiments ist in Abb. 3 gegeben. Im gewohnten mathematischen Formalismus lässt sich das Gedankenexperiment wie folgt ausdrücken. Die Eigenzustände der Katze sind durch  $|\psi_1\rangle = |\text{tot}\rangle$  und  $|\psi_2\rangle = |\text{lebendig}\rangle$  gegeben. Vor der Messung, also bevor der Beobachter einen Blick in die Stahlkammer wirft, beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Atom zerfallen ist, was mit gleichbedeutend mit dem Tod der Katze ist, genau 50%. Entsprechend ist der Zustand vor einer Messung durch eine Linearkombination der beiden Eigenzustände mit gleicher Gewichtung gegeben. Bei zusätzlicher Berücksichtigung, dass  $|\langle\psi|\psi\rangle|^2 \stackrel{!}{=} 1$  gelten muss, ergibt sich der Zustand der Katze vor einer Messung zu [15, S. 478]

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle). \quad (22)$$





**Abbildung 3:** Gedankenexperiment Schrödingers Katze [C]

Erst durch die Registrierung des Messresultats entscheidet sich, ob sich die Katze im Zustand  $|\psi_1\rangle$  oder im Zustand  $|\psi_2\rangle$  befindet. Wird die Superposition von Eigenzuständen auch auf die makroskopische Katze angewandt ist sie unmittelbar vor dem Öffnen der Stahlkammer gleichzeitig *tot und lebendig*. Letztere Überlegung verleiht dem Gedankenexperiment das Gewand eines Paradoxons, da es vollkommen intuitiv erscheint, dass die Katze nur *tot oder lebendig* sein kann. Schrödinger verweist dazu im Anschluss an seine Ausführungen zur Katze selbst explizit darauf, „daß eine ursprünglich auf den Atombereich beschränkte Unbestimmtheit sich in grobsinnliche Unbestimmtheit umsetzt, die sich dann durch direkte Beobachtung entscheiden läßt“ [6, S. 812], was bereits in Abschnitt 2.3 angesprochen wurde. Des Weiteren mahnt Schrödinger an, dass sein Gedankenexperiment daran hindere, „in so naiver Weise ein „verwaschenes Modell“ als Abbild der Wirklichkeit gelten zu lassen“ [6, ebd.]. Er sieht in seinen Überlegungen keinen Anlass für einen Widerspruch, sondern viel mehr eine Erinnerung an den „Unterschied zwischen einer verwackelten oder unscharf eingestellten Photographie und einer Aufnahme von Wolken und Nebelschwaden“ [6, ebd.].

#### 2.4.2 Wigners Freund

Das oben diskutierte Gedankenexperiment Schrödingers Katze wurde 1961 von Eugene Paul Wigner zum Gedankenexperiment Wigners Freund erweitert [32], um die Relevanz des Moments des Ablesens eines Messgeräts und um die Rolle des Beobachters in einem subjektivistischen Sinne zu diskutieren. Die im folgenden gegebene Version des Gedankenexperiments entspricht nicht der ursprünglich von Wigner formulierten, ist jedoch zu der seinen äquivalent und gleichzeitig einfacher darzustellen.

Ausgegangen wird von der im Gedankenexperiment Schrödingers Katze beschriebenen Anordnung. Neben der Stahlkammer befindet sich ein Beobachter („Wigners Freund“) in einem Labor, welches einem abgeschlossenen Raum entspricht. Außerhalb des Labors hält sich ein zweiter Beobachter (Wigner selbst) auf. Wigners Freund wagt nun einen Blick in die Stahlkammer, womit er wie gewohnt *für sich* das Schicksal der Katze entscheidet. Anschließend verlässt er das Labor und unterrichtet Wigner über den Zustand der Katze, womit auch *Wigner selbst* das Messresultat erhält [33, S. 135]. Zu diesem Zeitpunkt ist jeder Beobachter eindeutig mit dem gleichen Messresultat verknüpft, das Paradoxe offenbart sich erst wieder bei der Frage, welchen Zustand die Katze vor dem Informationsaustausch der beiden Beobachter besaß beziehungsweise wann genau die Zustandsreduktion stattgefunden hat. Dies rückte das Bewusstsein des Beobachters in den Vordergrund der Diskussion. Dass jenes überhaupt in irgendeiner Art und Weise zu partizipieren scheint merkte bereits Heisenberg mit den Worten „In consequence, we are finally led to believe that the laws of nature wick we formulate mathematically in quantum theory deal no longer with the particles themselves but with our knowledge of the elementary particles“ an [34, S. 99-100]. Um dies zu verdeutlichen wird wieder der bekannte mathematische Formalismus angewandt. Die möglichen Eigenzustände der Katze, des Beobachters und des Gesamtsystems sind in Tab. 4 aufgelistet.

Eigenzustände Katze	Eigenzustände Wigners Freund	Gesamte Eigenzustände
$ \psi_1\rangle =  \text{tot}\rangle$	$ \chi_1\rangle =  \text{beobachte tote Katze}\rangle$	$ \Sigma_1\rangle =  \psi_1\rangle  \chi_1\rangle$
$ \psi_2\rangle =  \text{lebendig}\rangle$	$ \chi_2\rangle =  \text{beobachte lebendige Katze}\rangle$	$ \Sigma_2\rangle =  \psi_2\rangle  \chi_2\rangle$

**Tabelle 4:** Mögliche Zustände der Katze, von Wigners Freund und des Gesamtsystems

Befindet sich die Katze vor dem Nachsehen von Wigners Freund in der Superposition der beiden Eigenzustände mit je 50% Wahrscheinlichkeit, gilt wieder  $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle)$  (vgl. Abschnitt 2.4.1). Entsprechend Tab. 4 folgt dann für das Gesamtsystem

$$|\Sigma\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_1\rangle|\chi_1\rangle + |\psi_2\rangle|\chi_2\rangle). \quad (23)$$

Da es keinen Sinn ergibt, dass sich die Katze im Zustand  $|\psi_1\rangle = |\text{tot}\rangle$  befindet, während Wigners Freund im Zustand  $|\chi_2\rangle = |\text{beobachte lebendige Katze}\rangle$  ist (analog für den umgekehrten Fall), enthält der Ausdruck für das Gesamtsystem  $|\Sigma\rangle$  weder eine  $|\psi_1\rangle|\chi_2\rangle$  noch eine  $|\psi_2\rangle|\chi_1\rangle$  Komponente. Bis hierhin ergibt sich noch nichts Paradoxes. Um dies zu konstruieren wird davon ausgegangen, dass das Experiment beendet ist und sich beide Beobachter darüber einig sind, dass die Katze tot ist (die Argumentation kann analog mit der lebendigen Katze durchgeführt werden, es ergibt sich der gleiche Widerspruch). Dies war für Wigners Freund bereits entschieden bevor Wigner selbst es wusste. Im Nachhinein allerdings, also als Wigner schon über den Tod der Katze informiert war, gestaltet sich die Situation aus seiner Sicht anders. Bevor sein Freund nachgesehen hatte, war die Katze schon tot, allerdings wusste sein Freund dies noch nicht und Wigner selbst wusste es auch nicht. Folglich befand sich die Katze im Zustand  $|\psi_1\rangle$ , Wigners Freund allerdings konnte sich in beiden Zuständen  $|\chi_1\rangle$  oder  $|\chi_2\rangle$  befinden. Das Gesamtsystem befand sich aus Wigners Sicht also im Zustand

$$|\Sigma\rangle = |\psi_1\rangle|\chi_1\rangle \text{ oder } |\Sigma\rangle = |\psi_1\rangle|\chi_2\rangle. \quad (24)$$

Offenbar steht Gleichung (23) im Widerspruch zu Gleichung (24), da letztere den gemischten Term  $|\psi_1\rangle|\chi_2\rangle$  enthält, welcher in keinem Fall in ersterer Gleichung auftauchen kann.

Die Rolle des Beobachters wird deutlich, wenn Wigners Freund durch ein beliebiges weiteres Messgerät ersetzt wird, welches Wigner abliest, nachdem jenes den Zustand der Katze in Erfahrung gebracht hat. In diesem Fall beschreibt Gleichung (23) das Gesamtsystem korrekt und die Inkonsistenz durch Gleichung (24) tritt gar nicht erst auf. Daraus folgerte Wigner, dass das Bewusstsein eines Beobachters nicht durch Gleichung (24) beschrieben werden kann, weshalb der mit einem Bewusstsein behaftete Beobachter von einem Messgerät zu unterscheiden ist und die Zustandsreduktion verursacht [32, S. 295-302].

---

### 2.4.3 EPR-Argument und Bellsche Ungleichung

---

Das EPR-Argument hatte in seiner ursprünglichen Formulierung zwar eine andere Absicht, jedoch erweist sich seine Widerlegung durch die experimentelle Überprüfung der Bellschen Ungleichung als Anlass dazu, der Quantenmechanik eine nicht-lokale und eventuell nicht-reale Natur zukommen zu lassen, was für die spätere Argumentation von großem Interesse sein wird. Im Folgenden werden daher erst die benötigten Begriffe definiert und dann der Gedankengang des EPR-Arguments sowie die anschließende Widerlegung durch die Bellsche Ungleichung vorgestellt.

#### Lokalität und Realität einer physikalischen Theorie

Die Begriffe Lokalität und Realität bezüglich einer physikalischen Theorie seien wie folgt definiert.

1. Eine physikalische Theorie ist *lokal*, wenn ein Ereignis ein anderes Ereignis in seiner direkten räumlichen Umgebung beeinflusst.
2. Eine physikalische Theorie ist *realistisch*, wenn ein System ein Messresultat bezüglich einer physikalische Eigenschaft unabhängig von einer Messung durch einen Beobachter aufweist, selbst wenn der Beobachter das Messresultat wegen zu geringer Kenntnis des Systems nicht vorhersagen kann.

#### EPR-Argument gegen die Vollständigkeit der Quantenmechanik

Das Gedankenexperiment, welches in erster Linie die Vollständigkeit der Quantenmechanik anzweifelt und ihr bescheinigen will, keine klassische Theorie zu sein, wurde 1935 von Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen (kurz: EPR) vorgeschlagen [35]. Besonders Einstein missfiel der stochastische Kern der Quantenmechanik, was er in einem an Max Born adressierten Brief mit den oft zitierten Worten „*Jedenfalls bin ich überzeugt, daß der [Gott, Anm.] nicht würfeln.*“ [36] ausdrückte, weshalb er versuchte, sie durch die Einführung einer lokalen verborgenen Variable  $\lambda$  deterministisch beziehungsweise klassisch zu entwerfen und damit in seinem Sinne zu vervollständigen.

Im von EPR ursprünglich vorgeschlagenen Gedankenexperiment werden zwei Teilchen 1 und 2 betrachtet, deren Orte  $x_i$  und Impulse  $p_i$  mit  $i = 1, 2$  in einer Dimension gemessen werden sollen. Dabei sind Ort und Impuls in einer Dimension nach Gleichung (15) komplementäre Observablen. Vor der Messung erfahren die Teilchen eine Wechselwirkung, so dass sie durch nur einen verschränkten quantenmechanischen Zustand (vgl. Abschnitt 2.1.2) beschrieben werden müssen.



Ein anschauliches Beispiel für Verschränkung wäre, dass beide Teilchen aus einer Paarvernichtung stammen, wobei sich deren Impulse aufgrund der Impulserhaltung zu 0 addieren müssen. Anschließend werden die Teilchen räumlich separiert, wobei die Verschränkung erhalten bleibt. Wird nun beispielsweise an Teilchen 1 der Impuls  $p_1$  gemessen, ist durch die Verschränkung der beiden Teilchen das Messresultat für eine Messung des Impulses  $p_2$  von Teilchen 2 determiniert und zwar ohne dass Teilchen 2 selbst vermessen oder irgendwie gestört worden ist. Äquivalent dazu könnte anstatt dem Impuls  $p_1$  der Ort  $x_1$  von Teilchen 1 gemessen werden, womit analog der Ort  $x_2$  von Teilchen 2 exakt vorhergesagt wäre. In beiden Fällen wäre also die Messung einer Eigenschaft von Teilchen 2 durch eine Messung an Teilchen 1 möglich. Um daraus die Unvollständigkeit der Quantenmechanik abzuleiten, stellten EPR zwei Definitionen auf [35, S. 778].

1. Eine Theorie ist vollständig, wenn jedes Element der physikalischen Realität ein Analogon in der mathematischen Beschreibung durch die Theorie aufweist.
2. Ein Element der physikalischen Realität ist eine physikalische Größe, wenn deren Wert in einer Messung ohne Störung des System, an welchem sie gemessen wird, mit Sicherheit vorhergesagt werden kann.

Als erstes führten EPR an, dass nach einer Ortsmessung an Teilchen 1 der Ort von Teilchen 2 mit Sicherheit vorhergesagt ist, ohne, dass Teilchen 2 dabei gestört wurde, weshalb der Ort von Teilchen 2 nach (2.) ein Element *einer* physikalischen Realität ist. Weiterhin ist der Ort von Teilchen 2 ein Element einer physikalischen Realität unabhängig davon, ob der Ort von Teilchen 1 gemessen wurde oder nicht, was nur dadurch auszuschließen wäre, dass eine Ortsmessung an Teilchen 1 die physikalische Größe  $x_2$  kreieren würde. Letzteres wird von EPR strikt abgelehnt, da dies mindestens einen Widerspruch zur Annahme der Lokalität und eventuell einen Widerspruch zur Realität einer physikalischen Theorie darstellt. Ersteres bezeichnete Einstein geprägt von seiner Relativitätstheorie als „spukhafte Fernwirkung“ [37, S. 210]. Insgesamt gibt es also nach (1.) immer ein mathematisches Analogon in der Theorie für den Ort von Teilchen 2. Eine analoge Argumentation gilt für den Impuls von Teilchen 2. Da weiterhin die Wahl des Teilchens, an welchem eine Messung durchgeführt wird beliebig ist, müssen Ort und Impuls eines Teilchens Elemente *derselben* physikalischen Realität sein. Dies stellt offensichtlich einen Widerspruch zur Heisenbergschen Unschärferelation (Gleichung (15)) dar. Danach können Ort und Impuls nicht gleichzeitig mit Sicherheit vorhergesagt werden, weswegen nach (2.) nicht beide Größen Elemente derselben physikalischen Realität sein können. Nach (1.) ist die Quantenmechanik damit eine unvollständige Theorie. Insgesamt ergibt sich also die Alternative, dass die Quantenmechanik entweder eine unvollständige oder eine nicht-lokale und/oder nicht-realistische Theorie ist. Zuletzt sei angemerkt, dass das ursprüngliche Gedankenexperiment auf viele andere Beispiele mit verschränkten Zuständen angewandt werden kann. Im nächsten Abschnitt werden dies die Polarisationen zweier verschränkter Photonen sein.

### Bellsche Ungleichung und CHSH Ungleichung

Einen ersten Ansatz, um diese Frage zu entscheiden, lieferte John Stewart Bell 1964 mit seiner Bellschen Ungleichung [38], welche jedoch noch keine simple Möglichkeit der experimentellen Falsifizierung mit sich brachte. Dies erreichten John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony und Richard A. Holt (kurz: CHSH) 1969 mit ihrer verallgemeinerten CHSH Ungleichung [39], die im Folgenden kurz anschaulich anhand eines entsprechenden Aufbaus zu ihrer Überprüfung diskutiert wird.

Gegeben sind zwei Photonen, welche bezüglich ihrer Polarisation  $\lambda$  verschränkt sind. Da eine Lichtquelle stetig neue Photonen emittiert, ändert sich die Polarisation  $\lambda$  unvorhersagbar, sodass  $\lambda$  als eine lokale verborgene Variable angenommen werden kann. Hier sei angemerkt, dass die folgende Formulierung nicht zwangsweise von der klassischen Mechanik, sondern von einer beliebigen Theorie mit einer lokalen verborgenen Variablen ausgeht. Die Polarisation beider Photonen wird an zwei separaten Detektoren mit Winkeln  $\alpha$  und  $\beta$  bestimmt. Es ergeben sich vier Möglichkeiten. Entweder sind beide Photonen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit  $P_{HH}(\alpha, \beta)$  horizontal polarisiert, beide mit  $P_{VV}(\alpha, \beta)$  vertikal polarisiert, oder jeweils eins horizontal und eins vertikal polarisiert mit  $P_{HV}(\alpha, \beta)$  oder  $P_{VH}(\alpha, \beta)$ . In den ersten beiden Fällen ist die Polarisation identisch, in den beiden anderen Fällen nicht, sodass ein Erwartungswert  $E$  für die Polarisation definiert werden kann zu  $E(\alpha, \beta) = P_{VV}(\alpha, \beta) + P_{HH}(\alpha, \beta) - P_{VH}(\alpha, \beta) - P_{HV}(\alpha, \beta)$ , wobei  $E(\alpha, \beta) \in [-1, 1]$  gilt, da  $P_i(\alpha, \beta) \in [0, 1]$  für alle  $i$  ist [40, S. 7]. Für eine anschließende Detektion mit den Winkeln  $\alpha'$  und  $\beta'$  kann der Bellwert  $S$  definiert werden mit [40, ebd.]

$$S = E(\alpha, \beta) - E(\alpha, \beta') + E(\alpha', \beta) + E(\alpha', \beta'). \quad (25)$$

Da  $E(\alpha, \beta) \leq 1$  gilt, folgt in Gleichung (25) sofort [40, ebd.]

$$S \leq 2, \quad (26)$$

was der CHSH bzw. Bellschen Ungleichung entspricht.

---

Im Rahmen der Quantenmechanik ergibt sich jedoch [41, S. 20]

$$S = 2\sqrt{2}, \quad (27)$$

so dass ein Experiment die Alternative zweifelsfrei entscheiden kann.

### Widerlegung des EPR-Arguments durch das Experiment

Das erste Experiment, welches explizit die Verletzung der Bellschen Ungleichung (Ungleichung (26)) zeigen konnte, wurde 1972 von Stuart Freedman und John Clauser durchgeführt [42]. Es folgten Experimente, welche quantitativ mit dem Ergebnis der Quantenmechanik (Gleichung (27)) übereinstimmten, beispielsweise von Mohammad Lamehi-Rachti und Wolfgang Mittig im Jahre 1976 [43]. Damit war die Alternative nicht nur zu Ungunsten von EPR, sondern auch zu Gunsten der Quantenmechanik entschieden. Die Quantenmechanik erwies sich somit als vollständig und als nicht aus einer Theorie mit lokalen (sehr wohl aber mit nicht lokalen) verborgenen Variablen konstruierbar.

### Konsequenzen für die Nicht-Lokalität und die Nicht-Realität der Quantenmechanik

Entsprechend den experimentellen Befunden ist die Quantenmechanik eine nicht-lokale und eventuell eine nicht-realistische Theorie. Dies bekräftigte die Eigenschaft der Quantenmechanik nur stochastische Aussagen über den Ausgang einer Messung zu machen und fügte zudem eine neue Note hinzu. Nach Bohr wird bei einer Messung ein Messresultat nicht einfach *abgelesen*, sondern erst durch die Messung *hergestellt* (vgl. Abschnitt 3.1). Dies ist ein erster deutlicher Ansatzpunkt für eine Form von abwärtsgerichteter Kausalität im quantenmechanischen Messprozess, da in diesem Fall eine Messung eine echte Voraussetzung für ein Messresultat darstellt.

Des Weiteren ist es in der Quantenmechanik erlaubt, dass ein System, welches durch nur einen Zustand beschrieben wird, aus raumzeitlich weit voneinander entfernten Teilsystem besteht. Wird eines der Teilsysteme vermessen, erfolgt der Kollaps der gesamten Wellenfunktion instantan, so dass der Ausgang einer Messung am anderen Teilsystem augenblicklich determiniert ist. Es ist somit nicht nötig, dass Teilsysteme in einem klassischen Sinne miteinander wechselwirken müssen. Vielmehr existieren physikalische Situationen, in welchen es keinen Sinn ergibt, ein System, welches durch nur einen Zustand beschrieben wird, in weitere Teilsysteme zu separieren, wodurch sich das kontraintuitive Paradox einer „*spukhaften Fernwirkung*“ auflöst. Insgesamt ist die Quantenmechanik damit sicherlich nicht lokal und je nach Interpretation auch nicht realistisch.

---

## 2.4.4 Welcher-Weg-Information am Doppelspalt

### Grundlegende Überlegungen

Die Welcher-Weg-Information am Doppelspalt ist ein letztes Beispiel für die Rolle des Messprozess für das Messresultat. Richard Feynman diskutierte dies sehr ausführlich zu Beginn im dritten Band seiner Buchreihe *Feynman Vorlesungen über Physik* von 1975 [44], was als Grundlage für die folgenden Überlegungen dienen soll.

Gegeben ist ein Doppelspalt, welcher mit kohärentem Licht einer Wellenlänge, die in der Größenordnung des Spaltabstands liegt, beleuchtet wird. In einiger Entfernung zum Doppelspalt ist ein Schirm positioniert, auf welchem die Intensitätsverteilung des Lichts sichtbar gemacht werden kann. Jene kann auf zwei Arten berechnet werden. Zum einen im Rahmen der klassischen Physik, wobei Licht als Teilchen, genauer als Photon, aufgefasst wird und zum anderen im Rahmen der Quantenmechanik, in welcher Licht mit einer Wellenfunktion beschrieben wird. Interessant ist dann die Frage, wie die gesamte Intensitätsverteilung mit denen der Einzelspalte zusammenhängt, wenn einer von beiden geöffnet und der andere geschlossen ist.

### Licht beschrieben als Photonen in der klassischen Physik

Zunächst wird Licht als Teilchen im Rahmen der klassischen Physik aufgefasst. Zu Beginn ist einer der beiden Spalte geschlossen und der andere geöffnet. Auf dem Schirm ergibt sich eine Intensitätsverteilung  $I_1$ , welche ihr Maximum direkt gegenüber dem geöffneten Spalt hat und symmetrisch nach außen abfällt. Ist der andere Spalt geschlossen, so ergibt sich die selbe Intensitätsverteilung  $I_2$ , nun aber an der Position gegenüber dem anderen Spalt. Vergleicht man dies mit der gesamten Intensitätsverteilung  $I$  des Doppelspalts so folgt, dass dies der einfachen Addition beider Intensitätsverteilungen  $I_1$  und  $I_2$  entspricht, also [44, Kap. 1, S. 4]

$$I = I_1 + I_2. \quad (28)$$

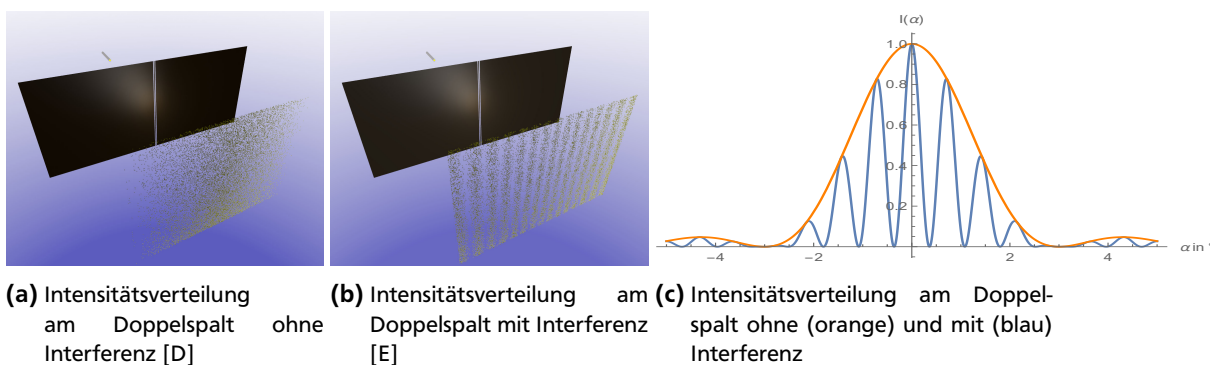
Die entsprechende Intensitätsverteilung ist schematisch in Abb. 4 (a) dargestellt und berechnet in Abb. 4 (c) in orange gegen den Beobachtungswinkel  $\alpha$  aufgetragen.

### Licht beschrieben mit einer Wellenfunktion in der Quantenmechanik

Nun wird das Licht mit einer Wellenfunktion  $\psi$  im Rahmen der Quantenmechanik beschrieben. Da das Betragsquadrat der Wellenfunktion  $|\psi|^2$  der Aufenthaltswahrscheinlichkeit entspricht (vgl. Abschnitt 2.1.1), ist die Intensitätsverteilung  $I$  durch eben jenes gegeben, also  $I = |\psi|^2$ . Wird nun wieder ein Spalt abgedeckt, ergibt sich analog zur vorherigen Betrachtung die gleiche Intensitätsverteilung  $I_1 = |\psi_1|^2$ . Wird der andere Spalt abgedeckt, ist die Intensitätsverteilung durch  $I_2 = |\psi_2|^2$  gegeben. Jedoch berechnet sich die gesamte Intensitätsverteilung  $I$  des Doppelspalts nicht aus bloßer Addition der einzelnen Intensitätsverteilungen  $I_1$  und  $I_2$ , sondern durch Addition der beiden Wellenfunktionen  $\psi_1$  und  $\psi_2$  zu einer Gesamtwellenfunktion  $\psi = \psi_1 + \psi_2$  des Doppelspalts. Werden für die Wellenfunktionen ebene Wellen  $\psi_n = \psi_{0,n} \cdot e^{i\omega t}$  mit  $n = 1, 2$  angesetzt, so folgt für die gesamte Intensitätsverteilung des Doppelspalts [44, Kap. 1, S. 5]

$$I = |\psi|^2 = |\psi_1 + \psi_2|^2 = |\psi_1|^2 + |\psi_2|^2 + 2|\psi_1||\psi_2| \cos \delta = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta, \quad (29)$$

wobei  $\delta$  der Phasendifferenz zwischen den beiden Wellen entspricht. Der Unterschied zu Gleichung (28) besteht im letzten Term  $2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$ , welcher als Interferenzterm aufgefasst werden kann. Die zugehörige Intensitätsverteilung ist schematisch in Abb. 4 (b) gezeigt und berechnet in Abb. 4 (c) in blau gegen den Beobachtungswinkel  $\alpha$  aufgetragen.



**Abbildung 4:** Vergleich zwischen den Intensitätsverteilungen am Doppelspalt ohne ((a) und orange in (c)) und mit ((b) und blau in (c)) Interferenz

### Welcher-Weg Information

Nun wird das Experiment in der Art verändert, dass die Intensität der Lichtquelle so weit verringert wird, bis immer nur ein einzelnes Photon den gesamten Aufbau durchläuft und auf den Schirm trifft, bevor ein neues Photon von der Lichtquelle emittiert wird. Dadurch wird eine Wechselwirkung der Photonen am Doppelspalt verhindert. Wird der Aufbau eine lange Zeit sich selbst überlassen, ergibt sich die gleiche Intensitätsverteilung mit Interferenz wie zuvor, obwohl die Interferenz der Einzelspalte kategorisch ausgeschlossen wurde [45, S. 81].

Eine nun intuitive Frage ist, durch welchen der beiden Spalte ein einzelnes Photon ging, bevor es auf den Schirm traf. Um dies herauszufinden, wird ein Detektor hinter dem ersten Spalt positioniert. Passiert ein Photon den ersten Spalt, so gibt der Detektor ein Signal und es ist ein heller Punkt auf dem Schirm zu beobachten, passiert es den zweiten Spalt, so ist nur ein heller Punkt auf dem Schirm zu sehen. Wieder nach einer langen Zeit wird die Intensitätsverteilung am Schirm betrachtet. Überraschenderweise entspricht jene der Intensitätsverteilung ohne Interferenz. Daraus muss gefolgert werden, dass die Information, welchen Weg das Photon durch den Doppelspalt genommen hat, die Interferenz zerstört. Diese Erkenntnis kann weitergeführt werden, in dem die ursprüngliche Frage in die folgende Behauptung umformuliert wird.

**Behauptung:** Ein Photon geht *entweder* durch den ersten *oder* den zweiten Spalt.

Es stellt sich heraus, dass diese Behauptung weder zwangsweise falsch noch zwangsweise richtig, sondern abhängig von der Fragestellung ist. Wird ein zusätzlicher Detektor vor einem der beiden Spalte positioniert, so lässt sich zweifelsfrei entscheiden, welchen Weg ein Photon genommen hat, womit die Behauptung wahr ist. Gleichzeitig fokussiert das Experiment damit die Teilchennatur des Lichts und die Interferenz verschwindet. Wird das Experiment ohne einen weiteren Detektor durchgeführt, so lässt sich die Behauptung nicht verifizieren. Es ist dann nicht nur nicht mehr möglich zu entscheiden, durch welchen Spalt ein Photon ging, es ist sogar *nicht erlaubt* zu sagen, dass ein Elektron durch den ersten oder den zweiten Spalt gegangen ist. Nun fördert das Experiment die Wellennatur des Lichts zu Tage und es zeigt sich Interferenz. Die Gewinnung der Welcher-Weg Information ist damit komplementär zur Beobachtung der Interferenz. Insgesamt folgt also, dass ein Messresultat abhängig von der konkreten Fragestellung an das Experiment und der im Experiment implementierten Vorstellung der physikalischen Realität ist [44, Kap. 1, S. 7-12].

---

### 3 Interpretationen und Phänomene der Quantenmechanik

---

Im letzten Kapitel und vor allem in den letzten beiden Abschnitten ist deutlich geworden, dass die Quantenmechanik ihrer Begründungslast nicht gerechnet worden ist. Sie verstrickt sich durch das Messproblem in Widersprüche, da die Anwendung des Formalismus auf makroskopische Objekte wie am Beispiel Schrödingers Katze scheitert. Darüber hinaus ist ihr probabilistischer Kern ein für die Physik atypisches Charakteristikum, welches nicht unumstritten und bei manchen Physikern nicht akzeptiert ist. Erschwert wird die Deutung der Quantenmechanik durch unintuitive Resultate wie der Verschränkung von Quantenzuständen, unpräzisen Begriffsdefinitionen wie beispielsweise das Messgerät, aber vor allem durch die Heisenbergsche Unschärferelation, welche der Beobachtbarkeit eine natürliche und unüberwindbare Grenze setzt. Diese Unstimmigkeiten ließen Raum für eine Vielfalt an Interpretationen der Quantenmechanik, über welche im folgenden dritten Kapitel ein Überblick gegeben wird.

---

#### 3.1 Kopenhagener Interpretation

---

Die Kopenhagener Interpretation wurde mit zwei Arbeiten von 1927 beziehungsweise 1928 von Werner Heisenberg [1] und Niels Bohr [2] begründet, wobei der Begriff selbst erst 1955 explizit von Heisenberg verwendet wurde [46]. Sie basiert auf der Wahrscheinlichkeitsinterpretation von Max Born [MB] und genießt in der Physik eine grundlegende Akzeptanz, aber keine allgemeine Gültigkeit, weswegen sie die pragmatische Variante der gängigen Interpretationen darstellt und zumeist in den Lehrbüchern anzutreffen ist.

##### Verhältnis der Quantenmechanik zur klassischen Physik

Besonders Bohr betonte, dass obwohl die Quantenmechanik zur Beschreibung der mikroskopischen Phänomene herangezogen werden muss, die in ihr enthaltenen physikalischen Begriffe wie z.B. der Ort oder der Impuls eines Teilchens aus den Erfahrungswerten der Alltagsvorstellung, also der klassischen Physik stammen. Die mikroskopische Ebene ist jene, in welcher die Wirkung  $S$  in der Größenordnung des Planckschen Wirkungsquantums  $h$  liegt. Da sich die Quantenmechanik offenbar von der klassischen Physik abgrenzt, müssen die klassischen Begriffe einen begrenzten Anwendungsbereich besitzen, außerhalb dessen Grenzen sie ihre Bedeutung verlieren. Nach Bohr *ergibt es keinen Sinn*, auf mikroskopischer Ebene von Ort und Impuls eines Teilchens zu sprechen.

Des Weiteren müssen die klassischen Begriffe prinzipiell bei jedem Messprozess berücksichtigt werden, da das Messgerät und das Messresultat zwangsläufig in jener Terminologie aufgefasst werden. Beispielsweise misst ein Amperemeter in einem Stromkreis einen makroskopischen Strom  $I$ , obwohl jener durch  $N_A$  viele mikroskopische Landungsträger der Ladung  $q = e$  hervorgerufen wird. Die Trennung in eine durch die Quantenmechanik und eine durch die klassische Physik beschriebene physikalische Vorstellung ist durch das Quantenpostulat, welches die Diskontinuität von Prozessen auf mikroskopischer Ebene postuliert, unvermeidbar und impliziert, dass eine Wechselwirkung zwischen System und Messgerät stattfinden muss, welche die Bedeutung einer *Übersetzung* von der mikroskopischen in die makroskopische Welt inne hat. Carl Friedrich von Weizsäcker verwies in diesem Zusammenhang darauf, dass die Verknüpfung der quantenmechanischen Vorhersagen mit klassischen Begriffen notwendig ist, da das Messgerät nur wahrgenommen werden kann, wenn es klassisch aufgefasst wird. Außerdem können die am Messgerät abgelesenen Eigenschaften nur dann zuverlässig mit dem eigentlichen Messobjekt in ein Verhältnis gesetzt werden [47].

Heisenberg fügte dem hinzu, „*dass wir unsere Experimente mit den Begriffen der klassischen Physik beschreiben müssen und gleichzeitig mit der Erkenntnis, dass diese Begriffe nicht genau auf die Natur passen. Die Spannung zwischen diesen beiden Ausgangspunkten ist für den statistischen Charakter der Quantentheorie verantwortlich*“ [48, S. 57-58]. Damit lieferte Heisenberg ein Argument für die Akzeptanz des statistischen Charakters und mahnte wie Bohr an, dass eine Beschreibung der mikroskopischen Phänomene nicht in Begriffen der klassischen Physik erfolgen kann.

##### Komplementarität

Es war wiederum Bohr, der den Begriff der Komplementarität, besonders mit seinem Komplementaritätsprinzip (vgl. Abschnitt 2.1.1), prägte. Komplementarität ist nach Bohr ein signifikantes Merkmal der Quantenmechanik. Dies drückt sich auf verschiedene Weisen auf. Ein direktes Beispiel für das Komplementaritätsprinzip ist der Welle-Teilchen-Dualismus. Jener äußerte sich besonders deutlich im Experiment zur Welcher-Weg-Information am Doppelspalt. Dort entschied die konkret im Experiment implementierte physikalische Vorstellung (Welle oder Teilchen), welche Eigenschaft im Messresultat sichtbar war (vgl. Abschnitt 2.4.4). Entsprechend kann ein Gesamtsystem bestehend aus System und Messgerät komplementäre Eigenschaften aufweisen, wobei bei jeder genauen Realisierung des Aufbaus nur eine Eigenschaft zu beobachten ist und prinzipiell kein Aufbau realisiert werden kann, welcher gleichzeitig beide Eigenschaften zu Tage fördert. Ein weiteres Beispiel ist die Heisenbergsche Unschärferelation (Gleichung (15)). Demnach kann kein Experiment realisiert werden, in welchem gleichzeitig der Ort und der Impuls eines Teilchens in einer Dimension beliebig genau bestimmt wird, da beide physikalische Größen komplementär zueinander sind. Insgesamt postuliert das Komplementaritätsprinzip damit die Kontextabhängigkeit von physikalischen Aussagen und die nicht gleichzeitige und dabei beliebig genaue Messbarkeit von komplementären physikalischen Größen.

---

### Raumzeitliche Vorstellung versus Kausalität

Der Begriff der Komplementarität hat auch weitreichende Konsequenzen für die raumzeitliche Vorstellung und die Kausalität in der Quantenmechanik. Beide Begriffe erhielten ihre Definition in der klassischen Physik. Die raumzeitliche Vorstellung in der klassischen Physik ist die Bahnkurve eines Teilchens (vgl. Abb. 1 (a) in Abschnitt 2.1.1), welche der Zuordnung vom exakten Ort  $\vec{r}$  zu einer beliebigen Zeit  $t$  entspricht. Im weiteren Sinne ist die raumzeitliche Vorstellung schlicht ein Erfahrungswert aus dem Alltag, dass beliebige physikalische Prozesse in einem raumzeitlichen Rahmen stattfinden.

Kausalität wird in der klassischen Physik als deterministische Zuordnung von Ursachen zu Ereignissen begriffen (genauer dazu ab Kapitel 4). Bohr argumentiert nun, dass der Zustand eines Systems nur dann wohldefiniert ist, wenn er keiner Störung durch eine Beobachtung ausgesetzt ist. Möchte man das Systems mit der Quantenmechanik beschreiben, bedeutet dies, dass die übliche raumzeitliche Vorstellung versagt, da die Möglichkeit der Beobachtung ausgeschlossen wurde. Andererseits ergibt sich, wenn man die Beobachtung als Wechselwirkung mit dem System zulässt, dass der Zustand des Systems nicht eindeutig definiert ist, womit der Kausalitätsbegriff nicht mehr angewandt werden kann. So ist es beispielsweise nicht möglich, die kausale Abfolge von atomaren Prozessen zu rekonstruieren, ohne jene dabei entscheidend zu stören. Bohr resümiert [2, S. 247]:

*„Nach dem Wesen der Quantentheorie müssen wir uns also damit begnügen, die Raum-Zeit-Darstellung und die Forderung der Kausalität, deren Vereinigung für die klassischen Theorien kennzeichnend ist, als komplementäre, aber einander ausschließende Züge der Beschreibung des Inhalts der Erfahrung aufzufassen, die die Idealisation der Beobachtungs- bzw. Definitionsmöglichkeiten symbolisieren.“*

Gemäß seinen Überlegungen forderte Bohr eine *Theorie der Komplementarität*, welche die vorliegenden Widersprüche zumindest klären soll.

### Bedeutung der quantenmechanischen Begriffe

Uneinig waren sich Heisenberg und Bohr in der Frage, in welchem Verhältnis die Aussagen der Quantenmechanik zur physikalischen Realität stehen. Bohr befand, dass die Quantenmechanik nicht direkt einer physikalischen Realität entsprechen kann, womit er den Realismus in der Quantenmechanik ablehnte. Vielmehr ist die mathematische Darstellung durch eine Wellenfunktion eine bloße Abstraktion, welche nicht mehr als ein Mittel zum Zweck sein kann. Dass physikalische Begriffe der klassischen Physik auf der mikroskopischen Ebene ihre Bedeutung verlieren, ist damit eine direkte Folge der fehlenden Objektivität der physikalischen Begriffen der Quantenmechanik.

Heisenberg hingegen kam zu dem Schluss, dass die Quantenmechanik realistisch aufgefasst werden kann, wenn dabei die Subjektivität des Beobachters im Moment der Beobachtung berücksichtigt wird. Er schreibt dazu [48, S. 55]:

*„Die Beobachtung selbst ändert die Wahrscheinlichkeitsfunktion unstetig. Sie wählt von allen möglichen Vorgängen den aus, der tatsächlich stattgefunden hat.“*

Weiterhin besitzt ein System außerhalb einer Beobachtung kein Pendant in der Quantenmechanik, da nach Heisenberg davon ausgegangen werden muss, „dass das Wort „geschieht“ sich nur auf die Beobachtung beziehen kann, nicht auf die Situation zwischen zwei Beobachtungen“ [48, S. 56].

Die Subjektivität des Beobachters bringt allerdings einen anderen Gesichtspunkt mit sich, nämlich die prinzipiell unvollständige Kenntnis des Beobachters über den Zustand des Systems. So beschreibt die Wellenfunktion nach Heisenberg objektiv und vollständig den Zustand eines Systems, dessen Zeitentwicklung durch die Schrödinger-Gleichung repräsentiert wird, jedoch ist die subjektive Kenntnis darüber durch die Heisenbergsche Unschärferelation nicht prinzipiell vollständig [48, ebd.]. Dem Beobachter kommt damit eine besondere und gleichzeitig undankbare Rolle zu. Obwohl durch ihn überhaupt erst der Schritt von einer Möglichkeit zu einer Faktizität zu Stande kommt, ist seine Kenntnis des Systems stets in einer Weise durch eine Grenze beschränkt, die nicht von ihm selbst durchbrochen werden kann. Er ist dazu verurteilt zu wissen, dass er nur wissen kann, weil er nicht weiß.

---

## 3.2 Viele-Welten-Interpretation

Die Viele-Welten-Interpretation ist neben der Kopenhagener Interpretation wohl die bekannteste und wurde maßgeblich von Hugh Everett durch einen Artikel aus dem Jahre 1957 geprägt [3]. Er motivierte seine Bemühungen damit, die in der Kopenhagener Deutung übliche Trennung zwischen einer mikroskopischen beziehungsweise durch die Quantenmechanik beschriebenen Ebene und einer makroskopischen beziehungsweise durch die klassische Physik beschriebene Ebene aufzuheben und sämtliche physikalische Prozesse im Rahmen der Quantenmechanik und damit mit einer Wellenfunktion, welche die Schrödinger-Gleichung löst, zu beschreiben. Dadurch wäre der Kollaps der Wellenfunktion kein Postulat mehr, sondern aus grundlegenden Axiomen der Quantenmechanik ableitbar.

Die Bezeichnung „Viele-Welten-Interpretation“ wurde erst 1970 von Bryce DeWitt vorgeschlagen [49], da auf jenen auch der Gedanke zurückgeht, die nach der Quantenmechanik möglichen Messresultate als parallel realisierte Welten aufzufassen.



### Allgemein gültige Schrödinger-Gleichung, Messprozess und relative Zustände

Weil alle physikalischen Prozesse im Rahmen der Quantenmechanik beschrieben werden sollen, gilt die Schrödinger-Gleichung (Gleichung (19)) uneingeschränkt für alle abgeschlossenen Systeme, womit sich alle Systeme im Rahmen der Schrödinger-Gleichung deterministisch in der Zeit entwickeln.

Dies erweist sich intuitiv als vorteilhaft bei der einheitlichen Beschreibung des Messprozesses. Nun muss nicht mehr zwischen klassisch und quantenmechanischen zu beschreibenden Instanzen unterschieden werden, der Messprozess stellt lediglich eine Wechselwirkung zweier Instanzen dar, welche beide durch die Quantenmechanik beschrieben werden. Zur genaueren Ausdifferenzierung gesteht Everett dem Beobachter die Fähigkeit zu, sich an ein Messresultat zu erinnern. Daher muss die Messung den Zustand des Beobachters verändern, weshalb die Zustände von Beobachter und System allgemein als korreliert angenommen werden müssen.

Um dies mathematisch zu implementieren, entwickelte Everett das Konzept der relativen Zustände, damit die Zustände von Teilsystemen stets voneinander abhängig und nicht separabel sind und nur das Gesamtsystem einen eindeutigen reinen Zustand aufweist. Dazu ist ein System im Zustand  $|\Sigma\rangle$  aus dem Hilbertraum  $\mathbb{H}$  gegeben. Jenes System besteht aus zwei Teilsystemen mit Hilberträumen  $\mathbb{H}_1$  und  $\mathbb{H}_2$ , wobei  $\mathbb{H} = \mathbb{H}_1 \otimes \mathbb{H}_2$  (vgl. Abschnitt 2.1.2) gilt und die Hilberträume die Basen  $\{|\psi_n\rangle\}$  beziehungsweise  $\{|\chi_m\rangle\}$  besitzen. Dabei ist jedem beliebigen Zustand  $|\psi\rangle$  aus dem ersten System ein relativer Zustand  $|\chi\rangle$  aus dem zweiten System zugeordnet. Der Zustand des Gesamtsystems  $|\Sigma\rangle$  lässt sich dann nach Gleichung (16) schreiben als

$$|\Sigma\rangle = \sum_{n,m} c_{n,m} |\psi_n\rangle |\chi_m\rangle. \quad (30)$$

Nach dieser Formulierung kann den Teilsystemen kein Zustand im eigentlichen Sinn zugeordnet werden, es werden lediglich die Zustände der Teilsysteme untereinander relativ zu sich zugeordnet, sodass sich ein beobachtbarer Zustand des Gesamtsystems ergibt. Es lässt sich weiterhin zeigen, dass die Vorhersagen für eine quantenmechanische Messung äquivalent zur Bornschen Wahrscheinlichkeitsinterpretation bleiben. Letzteres verschaffte der Viele-Welten-Interpretation eine große Akzeptanz, da sie dazu in der Lage war, die bisherigen Ergebnisse formal zu reproduzieren. Des Weiteren zeigte dies, dass die Viele-Welten-Interpretation eine Interpretation und keine Theorie in neuem Gewand darstellt. Folglich ist sie im Experiment nicht von der Kopenhagener Interpretation zu entscheiden.

### Anwendung auf Schrödingers Katze

Schrödingers Katze ist ein Beispiel um zu zeigen, dass das Messproblem als solches nicht in der Viele-Welten-Interpretation auftritt und sich die Interpretation als selbstkonsistent erweist (vgl. Abschnitt 2.4.1).

Das Gesamtsystem aus Beobachter und Katze in der Stahlkammer soll als abgeschlossenes System angenommen werden. Die Eigenzustände der Katze sind wieder durch  $|\psi_1\rangle = |\text{tot}\rangle$  und  $|\psi_2\rangle = |\text{lebendig}\rangle$  gegeben, wobei jene Zustände orthogonale Eigenzustände sind, d.h. es gilt  $\langle\psi_1|\psi_2\rangle = 0$ . Der Beobachter neben der Stahlkammer, in welcher sich die Katze mitsamt der Apparatur befindet, wird durch die drei orthogonalen Eigenzustände  $|\chi_0\rangle = |\text{Katze unbeobachtet}\rangle$ ,  $|\chi_1\rangle = |\text{Katze tot}\rangle$  und  $|\chi_2\rangle = |\text{Katze lebendig}\rangle$  beschrieben mit  $\langle\chi_i|\chi_j\rangle = 0$  für  $i \neq j$ .

Befindet sich die Katze vor der Messung in einem Eigenzustand, gestaltet sich die Situation wie gewohnt einfach. Die beiden möglichen Zustände des Gesamtsystems  $|\Sigma_1\rangle$  und  $|\Sigma_2\rangle$  sind in Tab. 5 aufgelistet.

Präparation	Wechselwirkung	Registrierung
$ \psi_1\rangle  \chi_0\rangle$	$\xrightarrow{t}$	$ \Sigma_1\rangle =  \psi_1\rangle  \chi_1\rangle$
$ \psi_2\rangle  \chi_0\rangle$	$\xrightarrow{t}$	$ \Sigma_2\rangle =  \psi_2\rangle  \chi_2\rangle$

**Tabelle 5:** Gesamtzustände für die beiden Fälle, dass der Zustand der Katze in einem der Eigenzustände  $|\psi_1\rangle$  und  $|\psi_2\rangle$  präpariert ist

Ist der Zustand der Katze vor der Messung nun durch die Superposition der Eigenzustände mit  $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle)$  (Gleichung (22)) gegeben, folgt für den Zustand des Gesamtsystems bei der Registrierung mit den Relationen aus Tab. 5

$$|\Sigma\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle) |\chi_0\rangle \xrightarrow{t} \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_1\rangle |\chi_1\rangle + |\psi_2\rangle |\chi_2\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\Sigma_1\rangle + |\Sigma_2\rangle). \quad (31)$$

Zwar ist der Gesamtzustand wieder eine Superposition aus zwei Zuständen, womit das Ergebnis wieder uneindeutig ist, aber dennoch verhält es sich anders. Der Unterschied ergibt sich dadurch, dass beide Zustände orthogonal zueinander stehen und somit im Gegensatz zur Kopenhagener Interpretation prinzipiell nicht gleichzeitig realisiert werden können. Das Gesamtsystem befindet sich also nicht gleichzeitig in einer Superposition aus Zuständen, sondern es werden beide möglichen Zustände parallel für sich realisiert. Zusätzlich können die parallelen Realisierungen aufgrund der Orthogonalität der Zustände nicht interagieren. Bryce DeWitt interpretierte dies so, dass im Moment der Registrierung eine Aufteilung des Universums in mehrere Universen stattfindet, wobei in jedem Teiluniversum ein mögliches Messresultat realisiert ist [49]. Eine Veranschaulichung dieses Gedankens findet sich in Abb. 5.

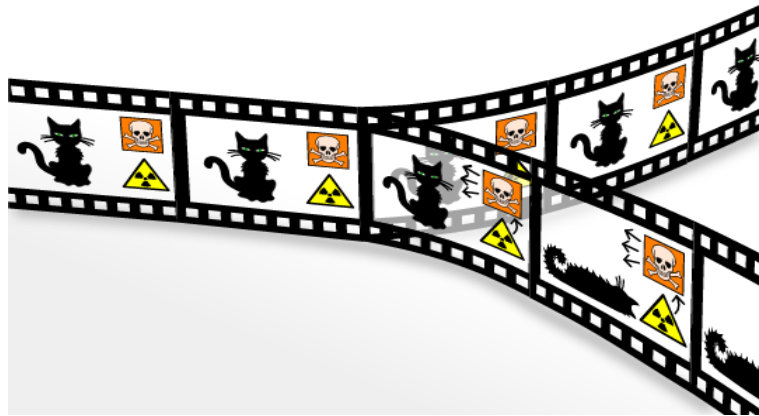


Abbildung 5: Viele-Welten-Interpretation am Beispiel von Schrödingers Katze [F]

### 3.3 Bohmsche Mechanik

Die Bohmsche Mechanik, häufig auch als De-Broglie-Bohm-Theorie bezeichnet, wurde unabhängig voneinander von Louis de Broglie 1927 [50] und David Bohm 1952 [4, 5] entwickelt. Im Gegensatz zu den beiden erstgenannten Interpretationen hat die Bohmsche Mechanik weniger Anhänger in der Physik. Der Grundgedanke der Bohmschen Mechanik besteht darin, dass sich sämtliche Teilchen auf wohldefinierten Trajektorien bewegen. Dazu wird neben der Schrödinger-Gleichung, welche von einer Wellenfunktion gelöst wird, eine Führungsgleichung, dessen Lösung die Bahnkurve des Teilchens darstellt, eingeführt.

#### Schrödinger-Gleichung und Führungsgleichung

Gegeben ist ein System mit  $N$  Teilchen. Um den Zustand aller  $N$  Teilchen vollständig zu beschreiben, wird neben der Wellenfunktion  $\psi(\vec{r}, t)$  jedem Teilchen  $i$  eine Trajektorie  $\vec{r}_i(t)$  mit  $i = 1, \dots, N$  zugeordnet. Die Wellenfunktion erfüllt dann die Schrödinger-Gleichung (Gleichung (1)). Die  $N$  Trajektorien sind Lösungen der  $N$  Führungsgleichungen [51, S. 135]

$$\frac{d}{dt} \vec{r}_i(t) = \frac{1}{m_i} \vec{\nabla}_i S, \quad i = 1, \dots, N, \quad (32)$$

worin  $S$  die Phase der komplexwertigen Wellenfunktion in ihrer Polardarstellung ist, also gilt [51, ebd.]

$$\psi(\vec{r}, t) = R(\vec{r}, t) \cdot \exp\left(\frac{i}{\hbar} S(\vec{r}, t)\right). \quad (33)$$

Die Führungsgleichung (Gleichung (32)) lässt drei Schlüsse zu. Erstens ist in ihr implizit die Wellenfunktion  $\psi(\vec{r}, t)$  enthalten, weswegen jene die Bahnkurve jedes Teilchens beeinflusst. Sie bildet das Analogon zu einem Potential in der klassischen Mechanik, welches Teilchen auf ihre Bahnen zwingt. Zweitens sind die Trajektorien der Teilchen zwangsläufig deterministisch, folglich ist die Bohmsche Mechanik selbst eine deterministische und darüberhinaus realistische Theorie. Da weiterhin sämtliche Trajektorien, welche als verborgene Variablen aufgefasst werden können, durch nur eine nicht-lokale Wellenfunktion hervorgerufen werden, ist die Bohmsche Mechanik nicht lokal, womit die Bellsche Ungleichung (Gleichung (26)) korrekterweise verletzt ist. Drittens ist die Führungsgleichung eine Differentialgleichung erster Ordnung. Es reicht daher die Kenntnis des Ortes zu einem beliebigen Zeitpunkt  $t_0$ , um die vollständige Trajektorie angeben zu können. Folglich ist zur Lösung der Führungsgleichung mindestens eine Anfangsbedingung notwendig.

### Quantengleichgewichtshypothese

Diese Anfangsbedingung ist durch die Quantengleichgewichtshypothese gegeben, welche besagt, dass „das Bornsche statistische Gesetz gilt“ [51, S. 140]. Entsprechend stellt die Verteilung des Betragsquadrats der Wellenfunktion  $|\psi(\vec{r}, t)|^2$  die Quantengleichgewichtsverteilung für die Trajektorien  $\vec{r}_i(t)$  dar, womit die Trajektorien  $\vec{r}_i(t)$  mit Wahrscheinlichkeiten gewichtet werden [51, S. 139]. Dass ein System, welches durch eine Quantengleichgewichtsverteilung beschrieben wird, immer durch diese Verteilung beschrieben werden kann, ist durch die quantenmechanische Kontinuitätsgleichung sichergestellt, welche als eine Erhaltung der Wahrscheinlichkeit interpretiert werden kann. Warum aber das System überhaupt zu einem beliebigen Zeitpunkt  $t_0$  durch die Quantengleichgewichtsverteilung beschrieben werden muss, ist Gegenstand aktueller Diskussionen. Nach Detlef Dürr folgt dies intuitiv aus der Bohmschen Mechanik, wenn ein geeignetes natürliches Maß zur Verträglichkeit der Anfangsbedingung mit der Quantengleichgewichtshypothese definiert wird [51, S. 189-191].

### Observablen, Messprozess und Determinismus

Observablen besitzen in der Bohmschen Mechanik keinen allgemeinen und gleichberechtigten Charakter, da der Ort eines Teilchens durch die Führungsgleichung explizit ausgezeichnet gegenüber anderen physikalischen Größen ist und ein Anfangsort zuzüglich der Wellenfunktion den Zustand eines Systems vollständig beschreibt. Folglich sind andere physikalische Größen lediglich aus diesen beiden abgeleitet.

Der größte Vorteil der Bohmschen Mechanik liefert ihre Anwendung auf das unerwünschte Messproblem, denn jenes taucht erst gar nicht auf. Da jedem Teilchen zu jedem Zeitpunkt eindeutig ein Ort in der Wellenfunktion zugeordnet ist, kann eine Überlagerung von Zuständen weder mikroskopisch noch makroskopisch auftreten. Verschiedene Messresultate sind damit immer eindeutig voneinander unterscheidbar.

Obgleich die Bohmsche Mechanik sämtliche physikalischen Phänomene deterministisch beschreibt, enthält auch sie stochastische Aussagen. Der Grund hierfür liegt in der prinzipiellen unvollständigen Kenntnis der Anfangsbedingungen, d.h. sowohl endliche Unkenntnis über die Wellenfunktion als auch über die Anfangsorte der Teilchen, welche bei der Quantengleichgewichtshypothese angenommen wurden. Es wird zwar davon ausgegangen, dass der Ort eines Teilchens zu jeder Zeit eindeutig existiert, jedoch ist dessen vollständige Kenntnis nie extrahierbar, womit der in der Kopenhagener Interpretation ungeliebte Zufall im Messprozess in die Anfangsbedingungen verschoben wurde. Summa summarum liefert auch die Bohmsche Mechanik identische quantitative Vorhersagen wie die Kopenhagener Interpretation und die Viele-Welten-Interpretation der Quantenmechanik.

### Anwendung auf die Welcher-Weg-Information am Doppelspalt

Zur Anwendung auf die Welche-Weg-Information am Doppelspalt sind zuerst zwei weitere Folgerungen aus der Führungsgleichung (Gleichung (32)) und der Wellenfunktion nötig. Zum einen folgt aus der Führungsgleichung, dass sich die Teilchenbahnen niemals schneiden können, da Gleichung (32) eine Differentialgleichung erster Ordnung ist und der Phasenraum im Fall der Bohmschen Mechanik mit dem Konfigurationsraum übereinstimmt. Zum anderen beschreibt die Wellenfunktion die Interferenz am Doppelspalt, welche bekanntlicherweise eine um die Mitte der Spalte symmetrische Intensitätsverteilung produziert (vgl. Abschnitt 2.4.4). Da sich die Teilchenbahnen nicht schneiden können, folgt daraus, dass kein Teilchen über die Symmetrieachse treten kann [51, S. 142]. Nach diesen Vorschriften mögliche Bohmsche Trajektorien durch den Doppelspalt sind in Abb. 6 dargestellt (auch zu finden in [51, ebd.]).

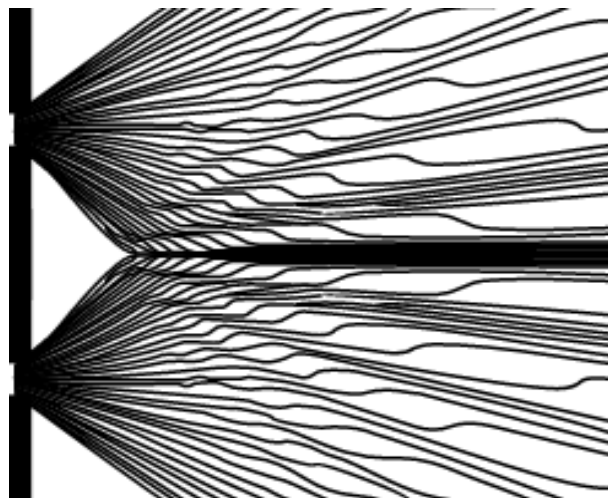


Abbildung 6: Bohmsche Trajektorien am Doppelspalt [G]



In Abb. 6 wird vor allem deutlich, dass Bohmsche Trajektorien nicht klassisch beschrieben werden können, da sie Richtungsänderungen ohne ein vorherrschendes Potential aufweisen. Im quantenmechanischen Sinne ist es die Quantengleichgewichtsverteilung der Wellenfunktion zusammen mit einem Anfangsort, welche die Bahnen der Teilchen vorgeben. Obwohl die Trajektorie jedes einzelnen Photons durch den Doppelspalt deterministisch ist und sicher ist, dass ein Photon, welches durch den oberen Spalt ging, auch auf der oberen Hälfte des Schirms landet, ist die Welche-Weg-Information nach wie vor komplementär zur Beobachtung der Interferenz. Welchen Spalt ein Photon passierte, ist aufgrund der unvollständigen Kenntnis seines Anfangsortes genauso zufällig wie die Position, an welcher es auf den Schirm auftritt [51, S. 143].

### 3.4 Dekohärenz

Die Idee der Einarbeitung der Dekohärenz in die Quantenmechanik geht auf einen Aufsatz von Heinz-Dieter Zeh aus dem Jahre 1970 zurück [7]. Zeh vermutete, dass die Wechselwirkung des Systems mit der Umgebung bisher nicht genügend berücksichtigt wurde und erkannte, dass jene unvermeidbare Konsequenzen für den beobachtbaren Zustand des Systems bedeuten. Zeh legte dabei besonderen Wert darauf, dass nicht die Umgebung das System stört, sondern das System die Umgebung stört und dies durch die Verschränkung von System und Umgebung das System selbst betrifft [52, S. 11]. In Zehs Berechnungen zeigte sich dann, dass das Auftreten von bisher ausschließlich klassisch interpretierbaren Messresultaten eine Folge von Dekohärenz ist.

#### Dekohärenz

Die Grundidee der Dekohärenz lässt sich an einem idealisierten Beispiel illustrieren, welches [53] nachempfunden ist. Gegeben ist ein Teilchen, welches sich in den beiden orthogonalen Zuständen  $|\psi_1\rangle$  oder  $|\psi_2\rangle$  befinden kann, denen zwei makroskopische Orte, beispielsweise „links“ und „rechts“ zugeordnet sind. Zu Beginn ist der Zustand des Teilchens durch eine gewöhnliche Superposition mit gleicher Wahrscheinlichkeit

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle) \quad (34)$$

beschrieben. Jede Beobachtung erfolgt durch eine Art von Wechselwirkung mit dem System, beispielsweise durch die Streuung eines Photons. Jenes Photon repräsentiert den Einfluss der Umgebung. Das Photon kann die orthogonalen Zustände  $|\chi_1\rangle$  oder  $|\chi_2\rangle$  annehmen, wobei jedem Zustand eine Propagationsrichtung, beispielsweise „nach oben“ und „nach unten“ zugeordnet ist. Das Photon befindet sich nun im Zustand  $|\chi_1\rangle$  (bewegt sich von unten nach oben auf das Teilchen zu). Der Gesamtzustand von Teilchen und Photon vor der Wechselwirkung ist dann intuitiv durch

$$|\Sigma_{\text{vor}}\rangle = |\psi\rangle |\chi_1\rangle \stackrel{\text{Gl. 34}}{=} \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle) |\chi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_1\rangle |\chi_1\rangle + |\psi_2\rangle |\chi_1\rangle) \quad (35)$$

gegeben. Wechselwirkt das Teilchen mit dem Photon, sind zwei Situationen denkbar. Befindet sich das Teilchen im Zustand  $|\psi_1\rangle$  (links) und das Photon im Zustand  $|\chi_1\rangle$  (bewegt sich von unten nach oben auf das Teilchen zu), kann das Photon am Teilchen reflektiert werden, sodass für den Gesamtzustand  $|\Sigma_{\text{nach}, 1}\rangle = |\psi_1\rangle |\chi_2\rangle$  folgt. Andernfalls hält sich das Teilchen im Zustand  $|\psi_2\rangle$  (rechts) auf, während sich das Photon wieder im Zustand  $|\chi_1\rangle$  befindet (von oben nach unten auf das Teilchen zubewegt), allerdings nicht auf das Teilchen trifft. Dann wird das Photon nicht reflektiert und der Gesamtzustand ergibt sich zu  $|\Sigma_{\text{nach}, 2}\rangle = |\psi_2\rangle |\chi_1\rangle$ . Da sich das Teilchen vor der Wechselwirkung in einer Superposition befand, ist der Gesamtzustand nach der Wechselwirkung durch die normierte Superposition der beiden Zuständen  $|\Sigma_{\text{nach}, 1}\rangle$  und  $|\Sigma_{\text{nach}, 2}\rangle$  gegeben zu

$$|\Sigma_{\text{nach},\rangle} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\Sigma_{\text{nach}, 1}\rangle + |\Sigma_{\text{nach}, 2}\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_1\rangle |\chi_2\rangle + |\psi_2\rangle |\chi_1\rangle). \quad (36)$$

Möchte nun ein Beobachter den Zustand des Teilchens bestimmen, muss er jenen aus dem Gesamtzustand extrahieren. Dies ist mathematisch durch die Dichtematrix möglich. Jene ist für das Gesamtsystem vor beziehungsweise nach der Wechselwirkung gegeben durch

$$\rho_{\text{vor}} = |\Sigma_{\text{vor}}\rangle \langle \Sigma_{\text{vor}}| \quad (37)$$

$$\rho_{\text{nach}} = |\Sigma_{\text{nach}}\rangle \langle \Sigma_{\text{nach}}|. \quad (38)$$

Jedes Teilsystem wird dann durch eine reduzierte Dichtematrix beschrieben, welche durch Bildung der Spur bezüglich des anderen Teilsystems berechnet werden kann. Dementsprechend folgt für die reduzierten Dichtematrizen des Teilchens

$$\rho_{\text{vor, T}} = \text{Tr}_P(\rho_{\text{vor}}) \quad (39)$$

$$\rho_{\text{nach, T}} = \text{Tr}_P(\rho_{\text{nach}}). \quad (40)$$

Die Berechnung dieser Ausdrücke liefert [53]

$$\rho_{\text{vor, T}} = \frac{1}{2}(|\psi_1\rangle\langle\psi_1| + |\psi_2\rangle\langle\psi_1| + |\psi_1\rangle\langle\psi_2| + |\psi_2\rangle\langle\psi_2|) \quad (41)$$

$$\rho_{\text{nach, T}} = \frac{1}{2}(|\psi_1\rangle\langle\psi_1| + |\psi_2\rangle\langle\psi_2|). \quad (42)$$

Der Vergleich der Gleichungen (41) und (42) zeigt den Effekt der Dekohärenz. Die Dichtematrix vor der Wechselwirkung (Gleichung (41)) gibt lediglich die makroskopische Superposition der beiden Zustände des Teilchens wie zu Beginn (Gleichung (34)) wieder, da  $\rho_{\text{vor, T}} = |\psi\rangle\langle\psi|$  gilt. Die Dichtematrix nach der Wechselwirkung (Gleichung (42)) hingegen zeigt, dass beide möglichen Zustände des Teilchens mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% im klassischen Sinne anzutreffen sind, da für die Dichtematrix allgemein  $\rho = \sum_n p_n |\psi_n\rangle\langle\psi_n|$  gilt und mit Gleichung (42)  $p_1 = p_2 = \frac{1}{2}$  folgt. Entsprechend befindet sich das Teilchen *entweder* im Zustand  $|\psi_1\rangle$  *oder* im Zustand  $|\psi_2\rangle$ . Durch die Wechselwirkung mit der Umgebung wurde aus einem Zustand makroskopischer Superposition ein Zustand, welcher sich aus zwei Zuständen zusammensetzt, deren Eintreten durch den absoluten Zufall gegeben ist. Den Effekt, dass sich durch die Wechselwirkung mit der Umgebung die Resultate der klassischen Vorstellung ergeben, wird Dekohärenz genannt. Um die Begriffe strikt zu trennen, bezeichnete Zeh die Messresultate als quasi-klassisch. Damit ersetzt die Dekohärenz insgesamt den Kollaps der Wellenfunktion in klassische Zustände durch einen scheinbaren Kollaps in quasi-klassische Zustände [52, S. 8].

Ein wesentlicher Punkt der Dekohärenztheorie, welcher im genannten Beispiel nicht zum Tragen gekommen ist, ist die Orthogonalität der Umgebungszustände. Im Beispiel wurde jene schlicht vorausgesetzt (entsprechen den Zuständen des Photons), jedoch muss gefragt werden, ob dies auch im realen Experiment angenommen werden darf. Im Experiment besteht ein Messgerät aus  $N_A$  vielen Teilchen, weshalb es  $N_A$  Freiheitsgrade besitzt, welche sich der direkten Beobachtung entziehen. Entsprechend besteht der Hilbertraum der Umgebungszustände, welche mit Messresultaten verschränkt sind, aus einer sehr hohen Zahl an Dimensionen. Bei einer zufälligen Auswahl zweier Vektoren ergibt das Skalarprodukt im hochdimensionalen Hilbertraum (fast) immer 0, womit die Umgebungszustände als orthogonal angesehen werden können [54, S. 6-7].

### Superselektion

Das obige Beispiel hat gezeigt, dass die Dekohärenz Systeme bei der Wechselwirkung mit der Umgebung in quasi-klassische Zustände überführt, jedoch ist dies mathematisch noch nicht rigoros formuliert. Dazu zeigte Erich Joos, dass eine Regel der Superselektion, welche die in einer Beobachtung anzutreffenden quasi-klassischen Zustände gegenüber den restlichen auszeichnet, aus den Annahmen zur Dekohärenz folgt. Dazu führte er die „Superladung Observable“  $Q$  wie folgt ein. Sind  $|i_\alpha\rangle$  Eigenzustände von kohärenten Teilsystemen, dann ist für ein festes  $\alpha$  eine Superposition mit

$$|\psi_\alpha\rangle = \sum_{i_\alpha} c_{i_\alpha} |i_\alpha\rangle \quad (43)$$

möglich. Der Operator der Superladung Observablen  $\hat{Q}$  hat die Superpositionen  $|\psi_\alpha\rangle$  als Eigenfunktionen, also gilt

$$\hat{Q}|\psi_\alpha\rangle = q_\alpha \cdot |\psi_\alpha\rangle \quad (44)$$

Wenn für alle beliebigen  $\hat{A}$

$$[\hat{Q}, \hat{A}] = 0 \quad (45)$$

gilt, dann entspricht  $\hat{Q}$  einer klassischen Observablen und die zugehörige Basis aus Eigenfunktionen  $\{|\psi_\alpha\rangle\}$  erweist sich als eine gegen die Dekohärenz robuste Basis. In diesen Überlegungen entspricht Gleichung (45) einer Regel der Superselektion und das System wird vermehrt in den Eigenzuständen  $|\psi_\alpha\rangle$  anzutreffen sein [55, S. 60-62]. Dies manifestiert sich bei der reduzierten Dichtematrix darin, dass jene in der betrachteten Basis aus Eigenzuständen und daran

---

gekoppelten Umgebungszuständen diagonal wird. Durch die Wechselwirkung zwischen System, Messgerät und Umgebung werden Superpositionen von Eigenzuständen instabil, das heißt sie gehen in Zustandsgemische über, so dass die reduzierte Dichtematrix nur in dieser Basis diagonal wird. Für Dekohärenz existiert also eine gegenüber anderen Basen ausgezeichnete Basis [54, S. 6].

### Dekohärenzzeit

Da Systeme der prinzipiellen Wechselwirkung mit der Umgebung ausgesetzt sind, wird eine Dekohärenzzeit eingeführt als Maß dafür, ab wann sich der Zustand des Systems durch Dekohärenz bei einem gegebenen Einfluss durch die Umgebung quasi-klassisch verhält. Um eine Vorstellung für diese Dekohärenzzeit zu bekommen, sei ein Beispiel genannt. Für ein Staubpartikel der Größenordnung  $10\ \mu\text{m}$  ist die Dekohärenzzeit unter Normalbedingungen ( $T = 273,15\ \text{K}$  und  $p = 101,325\ \text{Pa}$ ) bei der Streuung an Luftmolekülen von der Größenordnung  $t_{\text{dec}} \sim 10^{-13}\ \text{s}$  [55, S. 67]. Diese sehr kurze Dekohärenzzeit illustriert, wie schnell die Dekohärenz den Zustand des Systems verändert. Für makroskopische Objekte ist es damit intuitiv ersichtlich, dass makroskopische Superpositionszustände aufgrund Dekohärenz nicht beobachtbar sind.

### Messproblem

Obwohl die weitverbreitete Annahme existiert, dass die Dekohärenz das Messproblem löst, widerspricht ihr Schöpfer dieser Auffassung. Zeh betont, dass die Dekohärenz keine Aussagen über einzelne Messungen tätigt, sondern lediglich über eine Grundgesamtheit an Messungen, somit im Kern selbst statistisch ist und ohne ein Moment des Zufalls nicht auskommt [52, S. 11]. Dessen Interpretation kann jedoch im Rahmen der bisherigen Interpretationen der Quantenmechanik erfolgen. Dies verdeutlicht gleichzeitig den Hauptunterschied der Dekohärenz zu den vorherigen Überlegungen. Die Dekohärenz ist ein Phänomen und keine Interpretation der Quantenmechanik. Sie erweitert den Formalismus um den Einfluss der Wechselwirkung zwischen System und Umgebung ohne in der philosophischen Diskussion Stellung zu beziehen.

### Anwendungen

Die Nützlichkeit des Konzepts der Dekohärenz zeigt sich beispielsweise an dem Gedankenexperiment Wigners Freund. Sogar Wigner selbst revidierte seine Auffassung eines vom Bewusstsein des Beobachters induzierten Kollaps der Wellenfunktion, nachdem er die Arbeiten von Zeh erhielt. Ähnlich den vorigen Überlegungen findet Wigner seinen Freund nicht in einem Superpositionszustand wieder, da die Dekohärenzzeit die Zeitdauer, die zur Überbringung der Nachricht benötigt wird, weit übersteigt. Der Zustand der Katze ergibt sich für Wigner dann nach rein stochastischen Berechnungen in klassischem Sinne. Auch hier muss betont werden, dass die Dekohärenz nicht erklären kann, welchen Zustand die Katze tatsächlich einnimmt, sondern lediglich die Superposition von makroskopischen Zuständen weitgehend ausschließt. Des Weiteren kann die Dekohärenz auf das Doppelspaltexperiment angewandt werden. Experimentelle Voraussetzung für das Zustandekommen der Intensitätsverteilung mit Interferenz ist, dass die einfallende Welle kohärent ist. Allgemein bezeichnet Kohärenz die zeitlich und räumlich konstante Phasenbeziehung zwischen Wellen, was den Begriff Dekohärenz insofern motiviert, dass durch Dekohärenz Interferenzeffekte zerstört werden, da Kohärenz eine Voraussetzung für Interferenz darstellt. Wird nun versucht die Welche-Weg-Information am Doppelspalt zu extrahieren, ist es nötig, einen der beiden Spalte zusätzlich zu beobachten. Dies stellt eine Wechselwirkung mit der Umgebung dar, welche die Beobachtung der Intensitätsverteilung am Schirm verändert. Die Dekohärenz zerstört die konstante Phasenbeziehung zwischen den einzelnen Zuständen, sodass Interferenz nicht mehr möglich ist und das Interferenzmuster verschwindet. Die Komplementarität der Welcher-Weg-Information und des Erscheinens des Interferenzmusters kann also im Rahmen der Dekohärenz erklärt werden.

---

## 4 Kausalität

---

In den bisherigen Betrachtungen lag der Fokus auf dem Facettenreichtum des quantenmechanischen Messprozesses. Das vierte Kapitel widmet sich dem Begriff Kausalität, welcher in den Disziplinen Philosophie Physik eingeführt und anhand von Schriften verschiedenster Autoren ausdifferenziert wird. Der Begriff Kausalität ist einer der Grundbegriffe der Philosophie und der Physik. Er scheint genauso intuitiv wie sein Pendant die Zeit, die er beschreiben will, aus der Alltagserfahrung zu entspringen, doch über letztere schrieb bereits Augustinus „*Was ist also die Zeit? Wenn mich niemand darnach fragt, weiß ich es, wenn ich es aber einem, der mich fragt, erklären sollte, weiß ich es nicht*“ [56, elftes Buch, 14. Kapitel]. Es folgt daher eine Einführung in die wichtigsten philosophischen Abhandlungen über den Begriff Kausalität, anschließend mögliche mathematische Formalisierungen der Kausalität und zuletzt die Position der Kausalität im Theoriegebäude der Physik.

---

### 4.1 Kausalität in der Philosophie

---

Die Diskussion des Kausalitätsbegriffes in der Philosophie erfolgt historisch. Angefangen in der Antike bei Aristoteles über die Vordenker der Aufklärung David Hume und Immanuel Kant bis hin zur modernen Ansätzen von John Leslie Mackie und David Leslie wird der Begriff Kausalität zu fassen versucht, damit die Anwendung auf die Physik gelingen kann.

#### Aristoteles

Für Aristoteles kann Wissen über eine Sache nur durch Kenntnis seiner Ursachen erlangt werden. Abgeprüft werden kann dies durch eine Frage nach dem *warum*, dessen Antwort als Implikation zur Erklärung der Sache dient. Aristoteles differenzierte dabei vier Typen von Ursachen beziehungsweise Fragen nach dem warum, die parallel auf eine Sache angewandt deren vollständige Erklärung liefern [57]. Diese sind:

1. *Causa materialis*, die Materialursache. Frage, aus was eine Sache entsteht.
2. *Causa formalis*, die Formursache. Frage, worin eine Sache besteht.
3. *Causa efficiens*, Wirkungsursache. Frage, woher der Anlass zum Beginn oder Ende einer Sache kommt.
4. *Causa finalis*, Zielursache. Frage, wozu eine Sache geschieht.

Beispielsweise ist die Materialursache einer Statue Bronze, aus der sie gegossen wurde, die Formursache ist eine Gussform, die Wirkungsursache ist ein Künstler und die Zielursache ist ein König, zu dessen Ehre die Statue erbaut wurde [57].

Es ist anzumerken, dass diese Klassifikation uneindeutig sein kann und dann Ursachen verschiedener Kategorien mehrfach auftauchen können. Weiterhin ist für den modernen Kausalitätsbegriff und vor allem für den Kausalitätsbegriff in der Physik hauptsächlich die Wirkungsursache von Bedeutung, da dies implizit in den Vorhersagen der Naturgesetze enthalten ist. Somit geht die Breite der Ansätze von Aristoteles weit über das heute in der Naturwissenschaft Übliche und zum Verständnis Nötige hinaus. Die Unterteilung in vier Typen ist damit vorrangig von historischer Bedeutung und soll im Kontext dieser Arbeit darauf aufmerksam machen, dass der Kausalitätsbegriff als Frage nach einer Ursache weiter gefasst werden kann als in der Naturwissenschaft.

#### David Hume

Die naturwissenschaftliche Auffassung von Kausalität erlitt einen schweren Schlag durch David Hume in seinem Werk *Eine Untersuchung über den menschlichen Verstand* von 1748 [58], welches eine Überarbeitung seines 1739 erschienenen Traktats über die menschliche Natur [59] war. Sein Programm zur Kausalität ist unter der *Humeschen Metaphysik* bekannt geworden.

Hume differenzierte die Philosophie in sieben Relationen aus, die da sind: Ähnlichkeit, Verhältnisse der Quantität oder Zahl, Grade einer Eigenschaft, Widerstreit, Identität, zeitliche und räumliche Beziehungen und Ursächlichkeit [59, S. 90]. Die genannten sieben Relationen unterteilte er in zwei Gruppen. Die vier ersten Relationen sind relativ zur menschlichen Vorstellung konstruiert und sind damit von ihr abhängig [59, ebd.]. Des Weiteren bilden sie die Grundlage für jegliche Form von Wissen [59, S. 94]. Die anderen drei Relationen dagegen sind nicht von menschlicher Vorstellung bedingt und können unabhängig davon vorhanden sein oder nicht [59, S. 95]. Hume führt weiter aus, dass die Ursächlichkeit von diesen die einzige Relation ist, die über das einem Menschen Zugängliche hinausgeht und daher einen universellen Charakter aufweist [59, S. 96]. Er illustrierte dies am Beispiel der Ermordung von Caesar. Keiner der heute lebenden Menschen kann ein Augenzeuge sein, die Kenntnis dieses Ereignisses stammt lediglich aus Überlieferungen der Zeitzeugen und ist damit eine Wirkung als Resultat einer Kausalkette. Durch Kausalität sind Menschen also Informationen zugänglich, die nicht aus einer primären Beobachtung stammen können, aber durch die eindeutige kausale Verknüpfung trotzdem genauso als wahr angenommen werden dürfen [59, S. 106].

---

Ogbleich Hume damit die Wichtigkeit von Kausalität bei der Beschreibung von Ereignissen herausgestellt hat, kritisiert er die gängige Vorstellung von Kausalität scharf. Er unterscheidet eine kausale Verknüpfung zwar wie üblich in eine Ursache und eine Wirkung, jedoch ist seinen Überlegungen gemäß eine Ursache „ein Gegenstand, dem ein anderer folgt, wobei allen Gegenständen, die dem ersten gleichartig sind, Gegenstände folgen, die dem zweiten gleichartig sind. Oder mit anderen Worten: wobei, wenn der erste Gegenstand nicht bestanden hätte, der zweite nie ins Dasein getreten wäre“ [58, S. 92-93]. Die Problematik des Kausalitätsbegriffs im gewöhnlichen Gebrauch offenbart sich dann bei der Frage, welche Bedingungen an die Verknüpfung von Ursache und Wirkung gestellt werden müssen und von welcher Art diese sind. Hume formulierte dazu drei Bedingungen:

1. Beliebige Kontiguität von Ursache und Wirkung im Raum [59, S. 97]
2. Geordnete Kontiguität von Ursache und Wirkung in der Zeit, so dass erstere immer letzterer vorausgeht [59, S. 98]
3. Die beobachtete Folge einer beobachteten Ursache ist immer deren Wirkung [59, S. 99-100]

Dass zwei Ereignisse räumlich benachbart liegen müssen begründete Hume damit, dass räumlich entfernte Ereignisse über eine Kausalkette verknüpft sind, wobei deren Elemente stets räumlich benachbart sind [59, S. 97]. Des Weiteren ist es für Hume selbstverständlich, dass eine endliche zeitliche Differenz zwischen Ursache und Wirkung liegen muss, da sonst im Grenzfall eine Ursache mit ihrer Wirkung (und deren Wirkung, etc.) zusammenfallen würde, wodurch sich ein Gegenstand insgesamt überhaupt nicht in der Zeit verändern würde, womit die Zeit selbst nicht beobachtbar wäre [59, S. 98-99]. Die geordnete Abfolge von Ursache und Wirkung, also dass eine Ursache ihrer Wirkung vorausgeht, ist dabei eine definitionsgemäße Implikation [59, S. 98]. Die interessanteste Bedingung ist die Dritte, da sie sich hinsichtlich ihrer Stärke in der Aussagenlogik von den vorigen beiden unterscheidet. Die ersten beiden Bedingungen sind hinreichende Bedingungen, denn es ist offensichtlich, dass zwei raumzeitlich benachbarte Ereignisse kausal zusammenhängen können, aber nicht müssen, da deren aufeinanderfolgendes Auftreten auch zufällig sein könnte [59, S. 99]. Die dritte Bedingung hingegen ist eine notwendige Bedingung, sie definiert eine raumzeitlose Gesetzmäßigkeit, so dass nach einer Ursache stets ihre Wirkung beobachtet werden können muss [59, S. 99-100]. Diese Überlegung ist der Ausgang von Humes Kritik und steht im Einklang mit seinen Ansätzen zu einer empiristischen Erkenntnistheorie, denn die dritte notwendige Bedingung kann von keinem Beobachters jemals final überprüft werden. Vielmehr sei es für einen Beobachter Gewohnheit, wenn er in vielen gleichartigen Prozessen Ereignisse als Ursache und Wirkung verknüpft. Hume schreibt dazu: „Wenn aber viele gleichförmige Beispiele auftreten und demselben Gegenstand immer dasselbe Ereignis folgt, dann beginnen wir den Begriff von Ursache und Verknüpfung zu bilden“ [58, S. 95]. Eine tatsächliche Notwendigkeit in beobachteten Ereignisfolgen ist folglich prinzipiell nicht logisch ableitbar. Das als Ursache und Wirkung Bezeichnete ist damit nicht mehr als eine beobachtete, aber zu jedem Zeitpunkt durch eventuelle andere Beobachtungen revidierbare Regelmäßigkeit und es lässt sich nie mit Bestimmtheit sagen, dass einer Ursache stets die gleiche Wirkung folgt.

Die Implikationen dieses Gedankens liegen auf der Hand. Die zum damaligen Zeitpunkt gewohnte, auf der uneingeschränkten Gültigkeit von Naturgesetzen beruhende physikalische Theoriebildung war ad absurdum geführt und die Frage, ob der Mensch überhaupt dazu in der Lage ist, allgemein gültige, aus induktiven Schlüssen folgende Gesetzmäßigkeiten abzuleiten, war mit einem klaren Nein beantwortet. Hume verschob das als Gesetzmäßigkeit Angenommene mit seinen Überlegungen weg von einer objektiven Welt in das empiristisch geprägte menschliche Denken und ließ der Kausalität einen probabilistischen Charakter zukommen. So ist Kausalität nie eine sicher vorhersagbare Verknüpfung, sondern eine nach einer genügend großen Zahl an Wiederholungen wahrscheinliche Verknüpfung [59, S. 113-114].

Die Erweiterung dieser Gedanken ist als *Induktionsproblem* bekannt, welches ebenfalls von David Hume formuliert wurde und zeigt, dass die menschliche Erkenntnis nie aus induktiven Schlüssen gewonnen werden kann, da sich die Zukunft aus logischer Perspektive nie zwangsweise wie die Vergangenheit verhalten muss. Hume führt dazu präziser aus, dass es unmöglich ist, „dass irgendwelche Begründungen durch Erfahrung diese Ähnlichkeit der Vergangenheit mit der Zukunft belegen können, denn all diese Begründungen beruhen ja auf der Voraussetzung dieser Ähnlichkeit“ [58, S. 58]. Das Problem dieser Methodik ist offensichtlich, dass das zu Begründende (eine kausale Verknüpfung von Ursache und Wirkung) aus einer erfahrenen Vergangenheit abgeleitet wurde und per Definition auch in Zukunft gelten soll, womit es wiederum als gültig vorausgesetzt wird und damit zyklisch auf sich selbst verweist. Die übrigbleibenden möglichen Quellen der menschlichen Erkenntnis sind daher nur die Deduktion und die Empirie.

### Immanuel Kant

Immanuel Kant diskutierte den Kausalitätsbegriff ausführlich im Rahmen seines weltberühmten Werkes *Kritik der reinen Vernunft*, dessen zweite Auflage, welche in der heutigen Zeit am gebräuchlichsten ist, 1787 erschien [60]. Kausalität findet sich bei Kant in der Kategorienlehre. Nach Kant existieren *a priori* 12 Kategorien der reinen Vernunft, welche als Begriffe ausschließlich für den menschlichen Verstand anwendbar sind und nicht an reale Existenz oder Erfahrungen gebunden sind [60, S. 154 - 156]. Durch diese 12 Kategorien wird der menschliche Verstand eines Urteils befähigt und

ist dazu in der Lage, Erkenntnis zu gewinnen. Kant unterteilt die 12 Kategorien in vier Urteilsfunktionen, welchen jeweils drei Urteile zugeordnet sind [60, S. 155]. Die resultierende *Tafel der Kategorien* ist in Abb. 7 dargestellt.

<b>1.</b>	
<b>Der Quantität:</b>	
Einheit	
Vielheit	
<u>Allheit.</u>	
<b>2.</b>	<b>3.</b>
<b>Der Qualität:</b>	<b>Der Relation:</b>
Relation	der Inhärenz und Subsistenz
Negation	<i>(substantia et accidentis)</i>
Limitation.	der Kausalität und Dependenz
	<i>(Ursache und Wirkung)</i>
	der Gemeinschaft
	<i>(Wechselwirkung zwischen dem Handelnden und Leidenden).</i>
<b>4.</b>	
<b>Der Modalität:</b>	
Möglichkeit - Unmöglichkeit	
Dasein - Nichtsein	
Notwendigkeit – Zufälligkeit.	

**Abbildung 7:** Tafel der Kategorien nach Immanuel Kant, frei nach [IK, S. 156]

In der Tafel der Kategorien findet sich die Kausalität bei der Urteilsfunktion der Relation und ist damit eine Kategorie. Nach der *a priori* Voraussetzung der Kategorien ergibt sich sofort der signifikanteste Unterschied zu Hume. Während Hume die Notwendigkeit von Kausalität negierte, entspringt Kausalität bei Kant *a priori* und besitzt damit Gültigkeit vor jeder Erfahrung. Viel mehr ist Kausalität notwendig zur Beurteilung von Erfahrungen.

Kant begründet die ausgezeichnete Position der Kausalität im Rahmen seiner *Analogien der Erfahrung* [60, S. 274-312] mit der Chronologie der Zeit und betont dabei, dass es die Chronologie und nicht das Verstreichen der Zeit ist, welche die Beobachtungen Ursache und Wirkung in ein Verhältnis setzt [60, S. 297-299]. Er schreibt dazu, dass wenn es „eine formale Bedingung aller Wahrnehmungen ist, dass die vorige Zeit die folgende notwendig bestimmt (indem ich zur folgenden nicht anders gelangen kann, als durch die vorhergehende), so ist es auch ein unentbehrliches Gesetz der empirischen Vorstellung der Zeitreihe, [...]“ [60, S. 296]. Außerdem ist dies die einzige Möglichkeit, überhaupt empirische Aussagen abzuleiten, „denn nur an den Erscheinungen können wir diese Kontinuität im Zusammenhang der Zeiten empirisch erkennen“ [60, ebd.]. Allgemein bezieht sich Kausalität nicht auf die Dinge an sich, sondern auf die Dinge als Erscheinungen [60, S. 297], was die Rolle der Kausalität für die Naturwissenschaft deutlich werden lässt. Kausalität ist ein allgemeines Prinzip, welches unabhängig von jeder Erfahrung ist, die von ihr beschriebenen Gegenstände Ursache und Wirkung sind jedoch der anthropologischen Erfahrung zugeordnet. Dieser Gedanke ist ein wiederkehrender Kerngedanke in Kants transzendentaler Elementarlehre [60, S. 90-755], welche die Grundlage seiner Erkenntnistheorie einer wissenschaftlichen Metaphysik darstellt. Darin geht Kant von den kritischen Überlegungen bei Hume zur Unmöglichkeit einer induktiven Form von Erkenntnis aus und verneint diese in Skeptizismus mündende Position durch die Existenz von *synthetischen Urteilen a priori* in beispielsweise Mathematik und Physik [60, S. 65]. Ein synthetisches Urteil ist nicht analytisch, also wird es nicht durch die in einer Aussage implizit enthaltenen Definitionen gefällt, sondern folgt in einem Kontext zum menschlichen Verstand und geht damit über das analytische Urteil hinaus. Beispielsweise ist  $5 + 7 = 12$  ein synthetisches Urteil *a priori*. Die Zahlen 5 und 7 sind im Kontext der Mathematik definiert, wobei die Vereinigung beider Begriffe nicht die Zahl 12 hervorbringt, sondern erst aus der Anschauung folgt eine neue Zahl 12 und das synthetische Urteil  $5 + 7 = 12$  [60, S. 65-67]. Entsprechend diesen Überlegungen sieht Kant eine Naturwissenschaft, welche auf synthetischen Urteilen *a priori* beruht [60, S. 69]. Insgesamt folgt bei Kant damit eine auf Gesetzen *a priori* beruhende Physik, in welcher der Kausalitätsbegriff ein Urteil mit uneingeschränkter Gültigkeit darstellt, wobei die genaue Verknüpfung von Ursache und Wirkung nicht allgemein, sondern im Rahmen der Erfahrung, also der Erforschung der Natur geschieht.



---

### John Leslie Mackie

Der australische Philosoph John Leslie Mackie griff die Position der Ablehnung von notwendiger Kausalität von Hume auf und verallgemeinerte diese in seinem Essay *Causes and Conditions* von 1965 [61] auf die Fälle, in denen mehrere Ereignisse zu Ursachen und Wirkungen verknüpft werden. Zur präzisen Ausdifferenzierung der Ursachen führt er die sogenannte INUS-Bedingung ein, welche das Charakteristische einer Ursache definieren soll. Mackie definiert sie wie folgt [61, S. 245].

**INUS-Bedingung:** *Insufficient, but necessary part of a condition which is itself unnecessary but sufficient for the result.*

Demnach ist eine Ursache ein nicht hinreichender, aber notwendiger Teil einer Bedingung, welche selbst nicht notwendig aber hinreichend für eine zugeordnete Wirkung ist.

Mackie motiviert seine INUS-Bedingung am Beispiel eines Hausbrands, welches im Folgenden dargelegt wird [61, S. 245-246]. Man stelle sich einen Hausbrand vor, dessen Ursache nach der Löschung des Brandes festgestellt wird. Eine übliche Untersuchung ergibt, dass ein elektrischer Kurzschluss den Hausbrand verursacht hat. Wird nun geprüft, ob der Kurzschluss überhaupt eine alleinige Bedingung des Hausbrand sein kann, folgt simpel, dass dem nicht so ist. Denn zum einen kann der Kurzschluss durch eine beliebige andere Ursache, beispielsweise ein brennendes Streichholz, ersetzt werden, womit die Bedingung nicht notwendig ist und zum anderen führt der Kurzschluss nicht zwangsweise zu einem Hausbrand, da beispielsweise das Haus eine Sprinkleranlage besitzen kann oder aus feuerfesten Materialien gebaut ist, womit die Bedingung auch nicht hinreichend ist.

Sofort ergibt sich die Frage, wie der Kurzschluss dann überhaupt den Hausbrand verursacht haben kann, was auf die Wichtigkeit der Präsenz anderer Bedingungen führt. Als Beispiele wurden die Sprinkleranlage, deren Abwesenheit und brennbare Materialien, deren Anwesenheit zur Entstehung des Hausbrandes zweifelsohne nötig sind, genannt. Werden die einzelnen Bedingungen paarweise logisch durch ein *und* verknüpft, lässt sich die INUS-Bedingung auf die anfänglichen Teile beziehungsweise die resultierende Bedingung anwenden, was am Beispiel des Kurzschlusses und des Vorhandenseins von brennbaren Materialien durchgeführt wird. Nun ist die Bedingung *Kurzschluss und vorhandenes brennbares Material* gegeben, welche aus den Teilen *Kurzschluss* und *vorhandenes brennbares Material* besteht. Da neben dem Kurzschluss auch brennbares Material vorhanden sein muss, ist der Kurzschluss kein hinreichender Teil der Bedingung, gleichzeitig ist er aber per Definition für die Bedingung notwendig, womit die erste Hälfte der INUS-Bedingung für den Teil Kurzschluss erfüllt ist. Analoges folgt für das Vorhandensein von brennbarem Material. Darüber hinaus ist die Bedingung an sich nicht notwendig für den Hausbrand, da andere Bedingungen wie beispielsweise *brennendes Streichholz und brennbares Material* ebenfalls möglich sind, aber sicherlich hinreichend, da sie zu einem Hausbrand geführt hat. Damit erfüllt die Bedingung die zweite Hälfte der INUS-Bedingung.

Das Beispiel hat gezeigt, dass Ursachen als Teile von Bedingungen aufgefasst werden müssen und die ursprüngliche Formulierung der Untersuchung, dass der Kurzschluss den Hausbrand verursacht hat, nicht korrekt ist. Viel mehr ist es das Zusammenspiel verschiedener Faktoren, welche als Teile einer Bedingung einer Ursache genügen. So ist das im alltäglichen Sprachgebrauch als Ursache Aufgefasste keine Ursache an sich, sondern eine INUS-Bedingung. Erst die Verknüpfung von INUS-Bedingungen, also von Teilen oder Faktoren, zu einer Bedingung ergibt eine Auffassung von Ursächlichkeit. Natürlich lässt sich die gezeigte zweielementige Verknüpfung von Faktoren auf die Verknüpfung beliebig vieler Faktoren erweitern, beispielsweise könnte der Teil *kein Mensch zum Löschen im Haus* zur Bedingung hinzuaddiert werden.

Diese Überlegung führt den Gedankengang von Mackie wieder zurück zu Humes Ansatz. Denn wie sollte entschieden werden, welche Faktoren bei der Findung von Ursachen eine Rolle spielen, bevor eine entsprechende Erfahrung gemacht wurde. Ganz im Stil Humes sieht Mackie keine Möglichkeit für eine sichere Prognose von Wirkungen bei bereits beobachteten Ursachen, sondern nur eine nach beobachteter Regelmäßigkeit hohe Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von Wirkungen, so dass beispielsweise ein Kurzschluss und brennbares Material sehr wahrscheinlich einen Hausbrand verursachen werden [61, S. 251-252].

### David Lewis

Eine heute weit verbreitete Auffassung von Kausalität geht auf die Essays *Causation*, einen Ausschnitt aus *Philosophical Papers* und *Causation as Influence* von David Lewis aus den Jahren 1973, 1986 und 2000 zurück [62, 63, 64]. Wie John Leslie Mackie geht Lewis von Humes Auffassung von Kausalität aus und legt dabei den Fokus auf den Zusatz in der Definition von Hume, dass „*wenn der erste Gegenstand nicht bestanden hätte, der zweite nie ins Dasein getreten wäre*“ [59, S. 93] [62, S. 556]. Dies bindet Lewis in sein Programm der Kontrafaktuale ein, um darin Kausalität zu erklären.

Kontrafaktuale sind hypothetische in der Vergangenheit formulierte Aussagesätze und besitzen in der Philosophie einen hohen Stellenwert. Zu deren Definition sind zwei Ereignisse *A* und *B* gegeben. Ein kontrafaktischer Aussagesatz ist dann wie folgt definiert.

**Kontrafaktual:** *Wenn A eingetreten wäre, dann wäre B eingetreten.*

Grammatikalisch entspricht ein Kontrafaktual dem Irrealis der Vergangenheit und beschreibt ein nicht eingetretenes, aber mögliches Ereignis (daher *kontrafaktisch*), um mögliche Konsequenzen zu postulieren. Ein Beispiel für ein Kontra-

---

faktual wäre die Aussage „wenn Hans nicht zu spät losgelaufen wäre, dann hätte er den Zug nicht verpasst.“ Lewis liefert in seinen Essays verschiedene Ansätze für Definitionen von kausaler Abhängigkeit und Kausalität, welche chronologisch aufeinander aufbauen. In seinem ersten Aufsatz *Causation* definiert er kausale Abhängigkeit über Kontrafaktuale, wobei zu dessen Anwendung ein kleiner Umweg nötig ist. Kontrafaktische Aussagen besitzen für Ereignisse keinen Wahrheitswert, sondern nur für deren Eintreten oder deren Nicht-Eintreten, also deren Proposition. Intuitiv lässt sich jedes Ereignis eindeutig mit einer Proposition verknüpfen, so dass das Problem damit umgegangen wird. Ist also  $e$  ein Ereignis, dann ist  $O(e)$  die zugehörige Proposition, welche dann und nur dann wahr ist, wenn  $e$  auftritt. Mit dieser Überlegung definiert Lewis die kausale Abhängigkeit von Familien von Ereignissen (eine Verallgemeinerung zur kausalen Abhängigkeit von nur zwei Ereignissen) allgemein wie folgt [62, S. 562].

**Kausale Abhängigkeit für Familien:** Seien  $c_1, c_2, \dots$  und  $e_1, e_2, \dots$  eindeutige mögliche Ereignisse, wobei keine zwei  $c$ 's oder  $e$ 's voneinander abhängen. Dann hängt die Familie  $e_1, e_2, \dots$  kausal von der Familie  $c_1, c_2, \dots$  ab, wenn die Familie  $O(e_1), O(e_2), \dots$  kontrafaktisch von der Familie  $O(c_1), O(c_2), \dots$  abhängt.

Anders ausgedrückt: Ob  $e_1$  oder  $e_2$  oder ... eintritt hängt davon ab, ob  $c_1$  oder  $c_2$  oder ... aufgetreten ist. Um dieser Definition das Abstrakte zu nehmen und die Rolle der Kontrafaktuale herauszuarbeiten wird sie auf den einfachsten Fall, die kausale Abhängigkeit zweier Ereignisse  $c$  und  $e$ , reduziert. Dann lautet die Definition [62, S. 562-563].

**Kausale Abhängigkeit von Ereignissen:** Seien  $e$  und  $c$  zwei eindeutige mögliche Ereignisse. Dann hängt  $e$  kausal von  $c$  ab, wenn die Familie  $O(e), \neg O(e)$  kontrafaktisch von der Familie  $O(c), \neg O(c)$  in der folgenden Weise abhängt: Es gilt  $O(c) \rightarrow O(e)$  und  $\neg O(c) \rightarrow \neg O(e)$ .

Wieder anders ausgedrückt: Ob  $e$  eintritt hängt davon ab, ob  $c$  aufgetreten ist. Offenbar sind zwei Kontrafaktuale zur Definition nötig, da der Fall des Nicht-Eintretens beider Ereignisse berücksichtigt werden muss. Denn das zweite Kontrafaktual ist automatisch wahr, wenn sowohl das Ereignis  $e$  als auch das Ereignis  $c$  nicht eingetreten ist. Das erste Kontrafaktual ist wahr, wenn, sobald  $e$  eingetreten wäre, auch  $c$  aufgetreten wäre, was wiederum sofort wahr ist, falls  $e$  und  $c$  beobachtete Ereignisse sind. Insgesamt hängt also  $e$  kausal von  $c$  ab, wenn, im Fall, dass  $c$  nicht eingetreten wäre, auch  $e$  nicht aufgetreten wäre.

In seiner Analyse von Kontrafaktualen und der Anwendung auf Kausalität trifft Lewis eine wichtige Unterscheidung. Er differenziert Kausalität und kausale Abhängigkeit. Zwar ist die kausale Abhängigkeit von Ereignissen eine hinreichende Bedingung für Kausalität, jedoch ist sie keine notwendige Bedingung, da eine kausale Abhängigkeit nicht transitiv ist, die übergeordnete Kausalität nach Lewis allerdings schon [62, S. 563]. Dass kausale Abhängigkeit nicht transitiv sein muss, ist in ihrer Definition über Kontrafaktuale begründet und kann an einem Beispiel eingesehen werden. Allgemein sind drei Ereignisse  $A, B$  und  $C$  mit zweiwertiger kausaler Abhängigkeit als Kontrafaktual gegeben, d.h. es gilt  $A \rightarrow B$  und  $B \rightarrow C$ . Zwei Kontrafaktuale sind zum Beispiel „Hätte Portugal das Halbfinale der Europameisterschaft nicht gewonnen, wären sie nicht Europameister geworden“ und „Wäre Portugal nicht Europameister geworden dann wäre Frankreich Europameister geworden“, wobei die Transitivität offensichtlich verletzt ist, denn die Aussage „Hätte Portugal das Halbfinale der EM nicht gewonnen wäre Frankreich Europameister geworden“ ist nicht zwangsläufig korrekt, da im Falle einer Niederlage Portugals gegen Wales im Halbfinale auch Wales im Finale gegen Frankreich hätte Europameister werden können. Da Kausalität als Ganzes nach Lewis allerdings transitiv sein muss, führt er die Kausalkette ein. Eine Kausalkette ist eine endliche Abfolge von Ereignissen  $c, d, e, \dots$  wobei jedes Ereignis vom vorherigen Ereignis kausal abhängt, beispielsweise hängt  $d$  kausal von  $c$  ab. Dann ist ein Ereignis Ursache eines anderen, wenn eine Kausalkette zwischen diesen beiden Ereignissen existiert. Damit komplettiert Lewis die kausale Abhängigkeit zur Kausalität [62, ebd.].

In seinem Essay von 2000 erweitert Lewis seine Überlegungen zur Kausalität, welche hier nur kurz umrissen werden sollen. Im bisherigen Gedankengang existiert ein Fall, welcher außer Acht gelassen wurde, nämlich dass zwei verschiedene Ereignisse gleichzeitig stattfinden und als Ursachen für die selbe Wirkung dienen. Lewis tauft diesen Fall als *redundante Kausalität* [64, S. 182] und differenziert zwei Möglichkeiten. Zum einen könnten beide Ursachen gleichberechtigt (symmetrisch) zu der gleichen Wirkung führen, sodass nicht entschieden werden kann, welches Ereignis als eigentliche Ursache bezeichnet werden muss. Zu bemerken ist hier, dass Lewis diese Möglichkeit als unwichtig ansieht, da eine solche Situation schwer realisierbar und damit für die Analyse uninteressant ist [64, ebd.]. Die andere Möglichkeit wäre, dass die beiden Ursachen nicht gleichberechtigt (asymmetrisch) zu der gleichen Wirkung führen. Die übergeordnete und damit tatsächliche Ursache bezeichnet Lewis als *preempting cause* und die untergeordnete, also höchstens als Reserve eintretende Ursache wird *preempted cause* genannt [64, ebd.]. Zwar führen beiden Ursachen zur gleichen Wirkung, jedoch übertrumpft die *preempting cause* die *preempted cause*, was Lewis als *trumping* bezeichnet [64, S. 183], womit das Durchlaufen einer Kausalkette auch mit den neu eingeführten Begriffen möglich bleibt. Um die genaue Beziehung der Ursachen zu untersuchen, wechselt Lewis das Vokabular und ersetzt *Ursachen* durch *Einflüsse* [64, S. 190]. Davon ausgehend verallgemeinert er seine Definition für Kausalität, wobei dieser Schritt die Kernidee der ursprünglichen Definition beibehält, so dass dies für die folgenden Überlegungen nicht von Relevanz ist [64, S. 190-197] und guten Gewissens von der gegebenen Definition ausgegangen werden darf.



## 4.2 Mathematische Formalisierung von Kausalität

Der Begriff Kausalität lässt sich ebenfalls mathematisch formalisieren. So kann eine Kausalordnung definiert werden, auf dessen Grundlage in der Praxis beispielsweise die Zeit definiert werden kann. Des Weiteren ergeben sich in der simpel gehaltenen Sprache der Mathematik leicht die aus dem Alltagsverständnis bekannten kausalen Beziehungen zwischen mehreren Ereignissen wie zum Beispiel die bereits im vorigen Abschnitt genannte Kausalkette.

### Kausalordnung

Wird Kausalität als Verknüpfung von Ereignissen betrachtet, kann sie in der Mathematik als eine Ordnung, genauer als eine strenge Halbordnung aufgefasst werden [65]. Sei dazu  $\mathbb{M}$  die Menge aller Ereignisse  $E$  eines betrachteten physikalischen Prozesses. Kausalität ist dann eine Halbordnung mit Relation  $<$  auf  $\mathbb{M}$ , welche die Ereignisse nach ihrer kausalen Abfolge ordnet. Dabei existieren drei mögliche Relationen.

1. Ereignis  $A$  ist kausale Ursache von Ereignis  $B \Leftrightarrow A < B$
2. Ereignis  $B$  ist kausale Ursache von Ereignis  $A \Leftrightarrow A > B$
3. Ereignis  $A$  und Ereignis  $B$  sind kausal unabhängig voneinander  $\Leftrightarrow A \parallel B$

Da zwei Ereignisse  $A$  und  $B$  immer in einer dieser drei Relationen stehen, ist die Trichotomie erfüllt. Weiterhin kann aus  $A < B$  und  $B < C$  der kausale Zusammenhang  $A < C$  gefolgert werden, was der Transitivität entspricht. Insgesamt kann Kausalität also als eine strenge Halbordnung beschrieben werden.

### Kausalität bei beliebig vielen Ereignissen

Allgemein können drei Arten von Kausalität differenziert werden, wobei sich die Unterschiede durch die Anzahl der Ursachen und Wirkungen und der Art der Verknüpfungen zwischen ihnen ergeben [65].

**Monokausalität:** Ein Ereignis  $B$  wird von genau einem Ereignis  $A$  verursacht. Die Möglichkeit, dass andere unabhängige Ereignisse  $C, D, \text{etc.}$  ebenfalls alleine von Ereignis  $A$  verursacht werden, bleibt davon unberührt (vgl. Abb. 8 (a)).

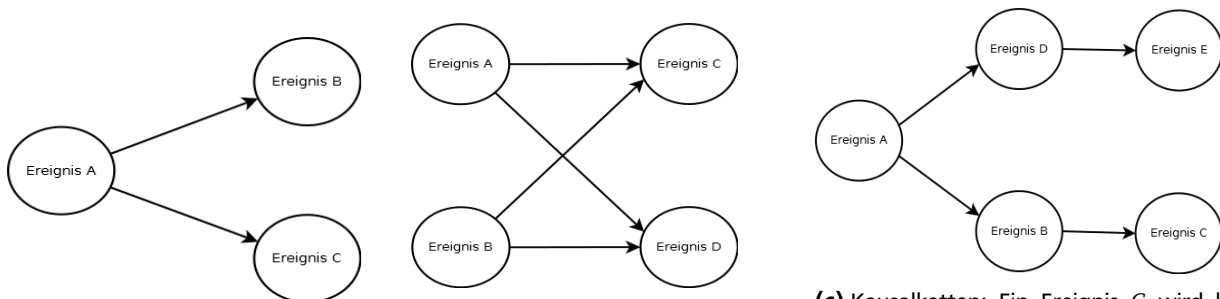
Beispielsweise verursacht die globale Erwärmung sowohl das Schmelzen von Gletschern als auch eine Häufung von Dürreperioden in bestimmten Regionen.

**Multikausalität:** Ein Ereignis  $C$  wird von mehreren Ereignissen  $A$  und  $B$  verursacht. Ebenfalls bleibt die Möglichkeit erhalten, dass andere unabhängige Ereignisse  $D, E, \text{etc.}$  von den Ereignissen  $A$  und  $B$  verursacht werden (vgl. Abb. 8 (b)).

Ein Beispiel ist ein Orchester, wobei jedes Instrument eine von vielen Ursachen für das Stück als Wirkung darstellt.

**Kausalkette:** Ein Ereignis  $C$  wird kausal eindeutig von einem Ereignis  $B$  verursacht, welches selbst kausal eindeutig durch ein Ereignis  $A$  bedingt ist. Wieder kann ein Ereignis  $E$  kausal eindeutig durch ein Ereignis  $D$  verursacht werden, welches kausal eindeutig durch das Ereignis  $A$  bedingt ist (vgl. Abb. 8 (c)).

Ein intuitives Beispiel für eine Kausalkette ist das Umfallen von aneinander gereihten Dominosteinen.



(a) Monokausalität: Die Ereignisse  $B$  und  $C$  sind kausal eindeutig durch ein Ereignis  $A$  bedingt

(b) Multikausalität: Die Ereignisse  $C$  und  $D$  sind kausal mehrdeutig durch die Ereignisse  $A$  und  $B$  bedingt

(c) Kausalketten: Ein Ereignis  $C$  wird kausal eindeutig durch ein Ereignis  $B$  verursacht, welches selbst kausal eindeutig von einem Ereignis  $A$  bedingt ist, analoges gilt für die Ereignisse  $E$  und  $D$

**Abbildung 8:** Kausalität bei beliebig vielen Ereignissen: Monokausalität (a), Multikausalität (b) und Kausalketten (c)

---

### 4.3 Kausalität in der Physik

---

Die Kausalität ist in der philosophisch orientierten Physik einer der wesentlichen Grundbegriffe und hat sich wie in der Philosophie selbst im Laufe der Zeit stark mit dem Aufkommen neuer Theorien gewandelt. Eng verbunden mit Kausalität ist in der Physik der Begriff des Determinismus, welcher bereits in Kapitel 3 ein Unterscheidungsmerkmal der diversen Interpretationen gewesen war. Beide Begriffe werden im Folgenden historisch durch das Theoriengebäude der Physik geführt, wobei besonderen Wert auf die Möglichkeit oder Unmöglichkeit von Kausalität gelegt wird. Um die Unmöglichkeit von kausalen Zusammenhängen zu zeigen, ist es stets ausreichend, dass eine Wirkung in der Vergangenheit ihrer Ursache liegt. Ist dies nicht der Fall, so ist Kausalität möglich.

#### Klassische Mechanik

Der Gegenstand der klassischen Mechanik ist die Beschreibung von Bewegungen von Massen (vornehmlich *Massenpunkten*), zum Beispiel durch eine Bahnkurve (vgl. Abb. 1 (a)), in geeigneten Koordinatensystemen. Sie ist axiomatisch durch die drei Newtonschen Gesetze aufgebaut, welche ursprünglich von Isaac Newton in seinen *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* von 1687 vorgeschlagen wurden [66]. Jene sind in der heutigen Formulierung gegeben durch [67, S. 173-176]

**Lex prima:** *Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung, wenn keine Gesamtkraft auf ihn wirkt.*

**Lex secunda:** *Die Kraft  $\vec{F}$  auf ein Teilchen der Masse  $m$  ist gegeben durch  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ .*

**Lex tertia:** *Die Kraft  $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$  von Körper 1 auf Körper 2 ist betraglich gleich und anti-parallel zur Kraft  $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$  von Körper 2 auf Körper 1 gerichtet, also gilt  $\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ .*

Die Bewegungsgleichung der klassischen Mechanik ist demnach das zweite Newtonsche Gesetz, welches für ein konkretes physikalisches Problem zu einer Differentialgleichung zweiter Ordnung wird. Zur vollständigen Bestimmung der Bahnkurve sind demnach zwei Anfangsbedingungen, ein Ort und eine Geschwindigkeit zu einer beliebigen Zeit nötig. Im Rahmen der klassischen Mechanik ist die beliebig genaue Kenntnis dieser Anfangsbedingungen möglich, so dass gemeinsam mit dem zweiten Newtonschen Gesetz eine vollständig determinierte Bahnkurve folgt.

Diese Folgerung ist unabhängig von der Formulierung der klassischen Mechanik. In der Lagrange-Mechanik erhält man ebenfalls eine Differentialgleichung zweiter Ordnung, welche auf die Bewegungsgleichung führt [68, S. 18] und in der Hamilton-Mechanik sind die zwei Differentialgleichungen erster Ordnung parallel zu lösen, so dass insgesamt immer zwei Anfangsbedingungen nötig sind [68, S. 94].

Wohingegen der Determinismus in der klassischen Physik voll realisiert ist, erweist sich die Kausalität als problematischer Begriff. Obwohl die Annahme der klassischen Mechanik einer absoluten und von Beobachtern unabhängige Raumzeit die zeitlich geordnete Abfolge von Ereignissen gewährleistet [69, S. 1] und im zweiten Newtonschen Gesetz ein schwaches Kausalprinzip der Form „*Einer Wirkung (Bewegung) geht eine Ursache (Kraft) voraus*“ implementiert ist, kann Kausalität im Humeschen Sinne nicht vollständig eingebunden werden. Das Problem hierbei ist das dritte Newtonsche Gesetz oder, um ein deutlicheres Beispiel zu wählen, das Newtonsche Gravitationsgesetz. Jenes beschreibt die Kraft  $\vec{F}$  zweier massebehafteter Körper  $m_1$  und  $m_2$  im Abstand  $r$  aufeinander und lautet vereinfacht [67, S. 179]

$$\vec{F} = -G \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{e}_r. \quad (46)$$

Offenbar wirkt die Kraft gleichzeitig, instantan und über beliebige Abstände auf beide Körper, sodass jeder Körper gleichermaßen als Ursache für eine Kraft auf den anderen Körper aufgefasst werden kann. Humes zweite Forderung beinhaltet jedoch, dass eine geordnete Kontiguität zwischen Ursache und Wirkung in der Zeit besteht (vgl. Abschnitt 4.1.1), welche im Falle von Gleichzeitigkeit der Ursache und Wirkung nicht erfüllt werden kann.

Gleiches gilt für die Definition von Lewis. Dort werden *zwei eindeutig mögliche Ereignisse* (vgl. Abschnitt 4.1.1) vorausgesetzt, welche bei der vollkommen symmetrischen Anordnung zweier Planeten nicht formuliert werden können. Einzig die INUS-Bedingung von Mackie erweist sich praktisch zur Beschreibung, da dort keine Eindeutigkeit oder Ähnliches vorausgesetzt wird.

Das Gravitationsgesetz zeigt das generelle Problem der klassischen Mechanik mit Kausalität auf. Die Bewegungsgleichungen sind invariant unter Zeitumkehr, das heißt ein in der klassischen Mechanik beschriebener Prozess könnte in beide Zeitrichtungen auf die gleiche Weise ablaufen. Die Zuordnung von Ursachen zu Wirkungen erscheint dann völlig absurd, da bei einer Zeitumkehrung die Wirkung ihrer Ursache vorausgeht und dies trotzdem konsistent mit der klassischen Mechanik bleibt. Ein strenges Kausalitätsprinzip kann daher nicht formuliert werden.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die klassische Mechanik deterministisch ist und eine Art Kausalitätsprinzip impliziert, jenem aber nicht umfassend gerecht werden kann.

## Klassische Elektrodynamik

Das Problem von instantanen und gleichzeitigen Fernwirkungen ist in der klassischen Elektrodynamik beseitigt. Jene fußt auf den vier Maxwellgleichungen, welche von James Maxwell zusammengetragen und entscheidend ergänzt worden sind. Maxwell veröffentlichte seine Überlegungen 1865 [70]. Die vier Maxwell-Gleichungen beschreiben das zeitliche und räumliche Verhalten von elektrischen und magnetischen Feldern. Bei geschickter mathematischer Kombination der Maxwellgleichungen folgt eine Wellengleichung für jedes Feld, so dass elektromagnetische Wellen postuliert werden können. Beispielsweise für das elektrische Feld  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  ist diese Wellengleichung im Vakuum ( $\mu = \epsilon = 1$ ) gegeben durch [71, S. 65]

$$\Delta \vec{E}(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E}(\vec{r}, t) = 0. \quad (47)$$

Daraus folgt, dass sich elektromagnetische Wellen mit Lichtgeschwindigkeit, also mit endlicher Geschwindigkeit ausbreiten. In der Elektrodynamik wirken Kräfte zwischen Ladungen demnach nicht instantan wie in der klassischen Mechanik, sondern werden über elektromagnetische Wellen vermittelt, welche eine endliche Zeit zur Vermittlung benötigen, wodurch Ereignisse eine strenge zeitliche Abfolge erhalten.

Trotz der Beseitigung von instantanen Kraftwirkungen birgt die Elektrodynamik ein anderes Problem. Jenes tritt auf, wenn das zeitabhängige elektrische Potential  $\phi(\vec{r}, t)$  beziehungsweise das magnetische Vektorpotential  $\vec{A}(\vec{r}, t)$  aus der zeitabhängigen Greensfunktion  $G(\vec{r}, t, \vec{r}', t')$  bestimmt werden soll. Die zeitabhängige Greensfunktion  $G(\vec{r}, t, \vec{r}', t')$  muss über ein Integral berechnet werden, dessen Integrand zwei Polstellen enthält [71, S. 81]. Anwendung des Residuensatzes liefert abhängig von der Lage der verschobenen Pole zwei Lösungen für die zeitabhängige Greensfunktion  $G(\vec{r}, t, \vec{r}', t')$ . Die resultierenden unterschiedlichen Klassen von Lösungen werden *retardierte* und *avancierte* Potentiale genannt und unterscheiden sich lediglich durch ein Vorzeichen, die genaue mathematische Form der Potentiale ist für die nachfolgende Betrachtung irrelevant. Trotz dieses Ergebnisses tauchen in der Natur nur retardierte Potentiale auf, wobei diese Wahl aus der axiomatischen Sicht der Elektrodynamik offensichtlich willkürlich ist.

Um dies mit Kausalität in Verbindung zu bringen, gibt es verschiedene Ansätze. Zuerst wird ein endlich ausgedehnter Quader mit leitender Oberfläche, in welchem eine Ladung oszilliert betrachtet. Die retardierten Lösungen entsprechen dann dem Fall, dass die Oszillation der Ladung eine Ursache für die Abstrahlung von elektromagnetischen Wellen ist, ganz analog zu einem Hertz'schen Dipol. Die avancierten Lösungen hingegen implizieren den umgekehrten Fall. Auf die Ladung trifft eine Kugelwelle, folglich beginnt die Ladung harmonisch zu oszillieren. Letzteres ist zwar aus thermodynamischer Sicht höchst unwahrscheinlich, da dazu aus sämtlichen Bereichen des Quaders gleichzeitig passende elektromagnetische Wellen einlaufen müssten, aber es wird die Möglichkeit einer kausalen Abhängigkeit gewahrt, indem Sendern die retardierten und Empfängern die avancierten Potentiale zugeordnet werden. Weiterhin drückt dies die Zeitinvarianz der zugrunde liegenden Maxwellgleichungen aus, da die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen symmetrisch im Raum und umgekehrt in der Zeit gleich ablaufen können, wenn die retardierten durch die avancierten Potentiale ersetzt werden [71, S. 85-88]. Ein anderer Ansatz besteht darin, die zeitliche Reihenfolge bei Vorgängen, welche durch die beiden Potentiale beschrieben werden, zu betrachten. Dazu sind zwei Orte  $\vec{r}_1$  und  $\vec{r}_2$  gegeben, wobei am Ort  $\vec{r}_1$  zur Zeit  $t_1$  ein Signal beobachtet wird, welches zur Zeit  $t_2$  am Ort  $\vec{r}_2$  ausgesandt wurde. Im Falle der retardierten Potentiale gilt  $t_1 = t_2 + \frac{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|}{c}$ , also ist  $t_1 > t_2$  und die Beobachtung kann kausal von der Aussendung abhängig sein. Für die avancierten Potentiale hingegen gilt  $t_1 = t_2 - \frac{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|}{c}$ , also ist hier  $t_1 < t_2$ , womit die Beobachtung des Signals seiner Aussendung vorausgegangen wäre. Dies ist offensichtlich ein Widerspruch zu einer kausalen Abhängigkeit, welche allerdings vorausgesetzt wurde [72, S. 401-402]. Somit würde aus den Maxwellgleichungen eine Lösung folgen, welche nicht mit der Kausalität verträglich ist. Zur Vervollständigung der Elektrodynamik müsste zusätzlich angenommen werden, dass in der Natur nur retardierte Lösungen anzutreffen sind. Die vier Maxwell-Gleichungen müssten um ein Kausalitätsprinzip, welches nicht aus der Elektrodynamik selbst folgt, ergänzt werden, welches avancierte Lösungen verbietet und alle Felder auf lokalisierte Quellen in der Vergangenheit zurückführt.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass die Elektrodynamik zwar einen großen Teil der Inkompatibilität der klassischen Mechanik mit Kausalität behebt, allerdings musste auch eingesehen werden, dass sie beruhend auf nur vier Maxwellgleichungen zu physikalischen Situationen führen kann, in welchen Kausalität nicht nur nicht möglich, sondern eindeutig verletzt ist.

## Relativitätstheorie

Weiter spezifiziert wird Kausalität in der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie (SRT beziehungsweise ART), welche beide von Albert Einstein begründet wurden. Erstere geht zurück auf die Artikel *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* [73] und *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?* [74], welche beide im „Wunderjahr 1905“ erschienen sind, letztere wurde erstmals von Einstein in dem 1916 erschienen Artikel *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie* [75] ausführlich dargelegt. Die SRT stellte nicht nur für das physikalische Weltbild eine Rundumerneuerung dar, auch die in der klassischen Mechanik noch unpräzise gefasste Kausalität ist in der SRT zum ersten mal vollständig realisiert. Um dies zu zeigen, werden zuerst die beiden Postulate der SRT genannt, welche sich

ausschließlich auf Inertialsysteme, d.h. Systeme, auf welche keine Gesamtkraft wirkt, beziehen. Jene sind gegeben durch [73, S. 895]

**Relativitätsprinzip:** Die physikalischen Gesetze sind in allen Inertialsystemen gleich.

**Konstanz der Lichtgeschwindigkeit:** In jedem Inertialsystem breitet sich Licht mit Lichtgeschwindigkeit  $c$  aus.

Diese beiden Postulate führten Einstein auf die Lorentz-Transformationen, welche die Transformation von gleichförmig bewegten Koordinatensysteme in andere gleichförmig bewegte Koordinatensysteme ermöglichte. Um ein Ereignis in beiden Koordinatensystemen parallel zu veranschaulichen, bietet sich das sogenannte Minkowski-Diagramm an. Ein typisches Minkowski-Diagramm für zwei Koordinatensysteme mit den Koordinaten  $(x, t)$  und  $(x', t')$ , wobei sich das gestrichene Koordinatensystem gegenüber dem ungestrichenen Koordinatensystem mit einer Geschwindigkeit  $v$  bewegt, ist in Abb. 9 (a) dargestellt. Darin sind die beiden Koordinatensysteme durch die gelben und blauen Achsen und das Ereignis durch den schwarzen Vektor symbolisiert. Die Winkelhalbierende beider (und allgemein aller) Koordinatensysteme ist durch die Lichtgeschwindigkeit  $c$  gegeben, in Abb. 9 (a) rot eingezeichnet. Jene teilt das Minkowski-Diagramm in drei Bereiche, denen bestimmte Arten von Ereignissen zugeordnet werden können. Um diese mathematisch zu unterscheiden wird das Längenquadrat  $s^2 = (ct)^2 - x^2$  eingeführt. Dann lassen sich die Ereignisse unterteilen in [69, S. 50-51]

**raumartige Ereignisse:**  $s^2 = (ct)^2 - x^2 < 0$ , vgl. Abb. 9 (a) in weiß.

**zeitartige Ereignisse:**  $s^2 = (ct)^2 - x^2 > 0$ , vgl. Abb. 9 (a) in blau.

**lichtartige Ereignisse:**  $s^2 = (ct)^2 - x^2 = 0$ , vgl. Abb. 9 (a) in rot.

Um Kausalität anhand dieser drei Arten von Ereignissen auszdifferenzieren, wird das Minkowski-Diagramm aus Abb. 9 (a) vereinfacht, indem die Hilfslinien ausgeblendet und kein ausgezeichnetes Ereignis betrachtet wird, so geschehen in Abb. 9 (b). Der von den lichtartigen Ereignissen (vgl. Abb. 9 (b) in gelb) eingeschlossene Bereich wird als Lichtkegel bezeichnet, da er in drei Dimensionen die geometrische Form eines Kegels innehat. Oberhalb der Abszisse befinden sich alle zeitartigen Ereignisse der Zukunft, unterhalb alle zeitartigen Ereignisse der Vergangenheit und der Ursprung repräsentiert die Gegenwart. Dass keine der beiden Achsen orthogonal aufeinander stehen, soll kein Hindernis sein. Die kausalen Beziehungen ergeben sich unter der Betrachtung zweier Ereignisse mit Koordinaten  $(ct_1, x_1)$  und  $(ct_2, x_2)$ , dessen Abstandsquadrat gemäß dem Längenquadrat gegeben ist durch [69, S. 51]

$$s_{12}^2 = c^2(t_1 - t_2)^2 - (x_1 - x_2)^2. \quad (48)$$

Die Fallunterscheidung erfolgt analog. Wenn  $s_{12}^2 < 0$  gilt, heißt der Abstand raumartig und Umformen von Gl. (48) liefert  $x_1 - x_2 > c(t_1 - t_2)$ , was bedeutet, dass kein Lichtsignal die Orte der Ereignisse überbrücken kann, womit sich die Ereignisse nicht kausal beeinflussen können. Weiterhin lässt sich immer eine Lorentz-Transformation finden, sodass die zeitliche Reihenfolge der Ereignisse vertauscht ist [69, ebd.]. Ist  $s_{12}^2 > 0$ , so ist der Abstand zeitartig und aus Gl. (48) folgt  $x_1 - x_2 < c(t_1 - t_2)$ , sodass sich die Ereignisse kausal beeinflussen können. Folgerichtig kann keine die Reihenfolge vertauschende Lorentz-Transformation gefunden werden [69, ebd.]. Der Fall  $s_{12}^2 = 0$  entspricht einem lichtartigen Abstand und aus Gl. (48) folgt, dass beide Ereignisse am selben Ort und zur selben Zeit stattfinden müssen, wodurch keine Anwendung auf Kausalität möglich ist und die Kausalität insgesamt in der SRT vollständig gewahrt ist.



(a) Minkowski-Diagramm für zwei Koordinatensysteme  $(x, t)$  und  $(x', t')$  (b) Minkowski-Diagramm mit eingezeichnetem Lichtkegel [H]

**Abbildung 9:** Minkowski-Diagramm allgemein (a) und mit Augenmerk auf den Lichtkegel (b)

---

Da die SRT für hinreichend kleine Raumzeitgebiete in der ART gilt, wird nur kurz auf den Kausalitätsbegriff in der ART eingegangen. Die bisherigen Überlegungen müssen ergänzt werden um den Fall, dass die nun mögliche Krümmung der Raumzeit durch Energiedichte den Lichtkegel eines Ereignisses in der Weise krümmt, dass sich Vergangenheit und Zukunft schneiden. Das Resultat ist eine geschlossene Kurve in der Raumzeit, in welcher sich Ereignisse fortlaufend identisch wiederholen würden, so dass der Kausalitätsbegriff seinen Ursprung verliert. Allgemein wurden diese Umstände in den Singularitäten-Theoremen von Stephan Hawking und Roger Penrose in mehreren Aufsätzen, wobei stellvertretend ein gemeinsamer Aufsatz von 1970 genannt sei [76], beschrieben. Hawking und Penrose folgerten darin die Existenz von Singularitäten, zum Beispiel schwarze Löcher, in der durch die ART beschriebene Raumzeit. In solchen Singularitäten ist die Kausalität ad absurdum geführt. Da für diese Arbeit vorsätzlich mit einem Messgerät oder einem Beobachter interagierende Systeme von Relevanz sind, kann über diesen Umstand hinweggesehen werden.

### Quantenmechanik

Der Grad der Realisierung von Kausalität in der Quantenmechanik ist, wie es sich schon in Kapitel 3 gezeigt hat, stark abhängig von der zugrunde liegenden Interpretation. In der Kopenhagener Interpretation vertrat Bohr die Ansicht, dass Kausalität und die raumzeitliche Vorstellung komplementär zueinander sind (vgl. Abschnitt 3.1). Dies impliziert, dass Kausalität nie vollständig implementiert werden kann, da jedes Experiment an die raumzeitliche Vorstellung gebunden ist. Bohr begründet dies mit der „Kleinheit des Wirkungsquantums gegenüber den für die gewöhnlichen Sinnesempfindungen in Betracht kommende Wirkung“ [2, S. 247], weshalb die geschlossene Beschreibung mit Kausalität in raumzeitlicher Vorstellung nur auf makroskopischer Ebene glückt.

In die gleiche Richtungen führen Überlegungen von Max Born, welcher besonders die in Theorien nicht herausgearbeitete Diskrepanz zwischen Determinismus und Kausalität betont. Nach Born ist Kausalität durch zwei Prinzipien charakterisiert, das Prinzip der Nahwirkung (*contiguity*, angelehnt an Humes Definition) und das Prinzip der Aufeinanderfolge (*antecedence*) [77, S. 103]. Ersteres verlangt, dass sich Wirkungen nur über kurze Distanzen ergeben können oder dass eine Kette von Wirkungen größere Distanzen überbrückt. Letzteres fordert, dass die Ursache ihrer Wirkung zeitlich vorausgeht. Folgerichtig erweist sich bei Born die klassische Mechanik als unverträglich mit einer Kausalität, da für Kräfte Fernwirkungen impliziert werden. Trotzdem ist die klassische Mechanik deterministisch in ihren Vorhersagen, womit offenkundig ein Unterschied zur Kausalität bestehen muss. In der Quantenmechanik hingegen ist die Situation gerade umgekehrt. Der probabilistische Charakter und der Messprozess in der Quantenmechanik macht Determinismus unmöglich, an einer beliebigen Stelle in einer Messung tritt der absolute Zufall auf. Andererseits ist die Kausalität in der Quantenmechanik nach Born nicht vollständig aufzugeben, sondern durch das Komplementaritätsprinzip zu ersetzen. Er führt dazu aus, dass der „wirkliche Sinn des Kausalitätsprinzips“ [77, S. 102] darin besteht, dass ungeachtet eines Experiments eine „zeitlose Beziehung zwischen Beobachtung und Beobachtungsbedingungen (Apparatur)“ [77, ebd.] existiert, welche Kausalität expliziert. Jenes Prinzip ist von der Physik lange fälschlicherweise als Determinismus aufgefasst worden, so dass man zur Folgerung gelangen könnte, dass auch die Quantenmechanik aufgrund ihrer nicht deterministischen Aussagen auch keine Kausalität zulässt. Dass die Quantenmechanik seiner Definition von Kausalität nicht vollständig genügen kann, wird mit den bekannten Argumenten von Bohr deutlich. Die Komplementarität der raumzeitlichen Vorstellung und der Kausalität verhindern eine Erfüllung des Prinzips der Aufeinanderfolge, da jenes an die raumzeitliche Vorstellung gebunden ist [77, S. 103-104].

Eine neue Sichtweise auf Kausalität in der Quantenmechanik liefert Werner Heisenberg. Er beginnt mit einer Bekräftigung des bisher Gesagten und erweitert, angefangen von klassischen Definitionen, den Kausalitätsbegriff auf die Quantenmechanik. Dazu stellt er den Kausalitätsbegriff der klassischen Mechanik durch die Unmöglichkeit der vollständigen Kenntnis eines physikalischen Systems durch störenden Einfluss der Beobachtung im Stil seiner Unschärferelation als *inhaltsleer* in der Quantenmechanik heraus. Er definiert das Kausalgesetz im Stil einer klassischen Physik wie folgt. „Wenn von einem abgeschlossenen System alle Bestimmungsstücke zu einer gegebenen Zeit genau bekannt sind, so lässt sich für die Zukunft das physikalische Verhalten des Systems daraus eindeutig berechnen“ [78, S. 180]. Die Voraussetzung kann aufgrund der Unschärferelation nicht erfüllt werden, also ist das Kausalgesetz im klassischen Sinne nicht in der Quantenmechanik gültig. Die Reanimierung von Kausalität erreicht Heisenberg durch ihre Einschränkung. Er formuliert dazu: „Wenn die Bestimmungsstücke eines isolierten Systems zu einer gegebenen Zeit genau bekannt sind, so gibt es zu jeder späteren Zeit Experimente an diesem System, deren Resultate genau determiniert sind und vorausberechnet werden können, wenn das System keinen Störungen ausgesetzt ist, außer denen, die durch das genannte Experiment verursacht werden“ [78, S. ebd.]. Demnach muss der störende Einfluss des Beobachters „herausgerechnet“ werden, um eine kausale Struktur von Ereignissen zu erreichen. Dass dies erfüllbar ist, lässt sich mit der Unitarität der Schrödinger-Gleichung begründen, da aus jener eine deterministische Zeitentwicklung von Zuständen folgt. Diese liegt außerhalb von Momenten der Beobachtung und ermöglicht kausale Zusammenhänge. Die Beobachtung stellt also eine Grenze für die Quantenmechanik dar, außerhalb derer sie im Heisenbergschen Sinne als kausal aufgefasst werden kann. Heisenberg betont jedoch, dass diese kausale Auffassung nicht zwangsweise einem Kausalgesetz gleichkommt, es sei „eine reine Geschmacksfrage“ [78, S. 181], ob man dies als gegeben annimmt oder nicht. Zwar kann der Kausalität ein minimaler Existenzbereich in der Quantenmechanik zugesichert werden, jedoch liegt dieser außerhalb der Beobachtung und erscheint somit fraglich [78, S. 182].



---

## 5 Abwärtsgerichtete Kausalität

---

Nachdem nun der Begriff der Kausalität in genügender inhaltlicher Breite eingeführt ist, erfolgt in diesem Abschnitt die Spezifikation auf abwärtsgerichtete Kausalität. Die im Folgenden vorgestellten Überlegungen gehen von der Einführung des Begriffs von Donald Campbell aus und danach zum größten Teil auf George Ellis zurück, welcher sich intensiv mit der Thematik rund um abwärtsgerichtete Kausalität und Emergenz beschäftigt. Zuletzt folgt die Anwendung von abwärtsgerichteter Kausalität auf den quantenmechanischen Messprozess.

---

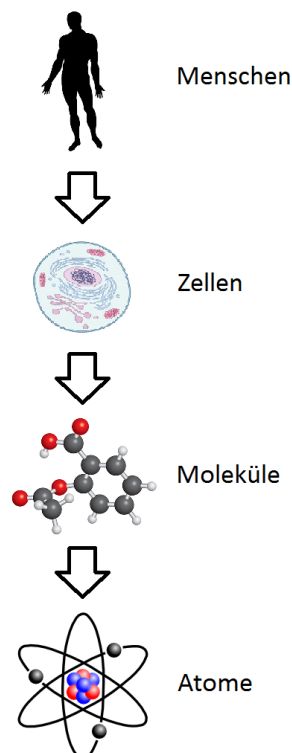
### 5.1 Ursprüngliche Definition bei Donald T. Campbell

---

Der Begriff abwärtsgerichtete Kausalität (engl. top-down oder downward causation) geht auf einen Essay von Donald T. Campbell aus dem Jahre 1974 zurück [8, S. 180], in welchem Campbell eine mögliche abwärtsgerichtete Kausalität in hierarchisch organisierten biologischen Systemen untersucht. Von zwei reduktionistischen Prinzipien zur Beschreibung von solchen System ausgehend vereinigt Campbell diese mit dem physikalischen Verständnis von Kausalität. Er schreibt dazu:

*„Where natural selection operates through life and death at a higher level of organisation, the laws of the higher-level selective system determine in part the distribution of lower-level events and substances. Description of an intermediate-level phenomenon is not completed by describing its possibility and implementation in lower-level terms. Its presence, prevalence or distribution (all needed for a complete explanation of biological phenomena) will often require reference to laws at a higher level of organisation as well. [...] all processes at the lower levels of a hierarchy are restrained by and act in conformity to the laws of the higher levels“* [8, ebd.].

Zu erwähnen ist hierbei, dass er selbst seine Terminologie, insbesondere seinen Neologismus *abwärtsgerichtete Kausalität*, als „*ungünstig*“ bezeichnet, er rechtfertigt dies jedoch mit der Uneinigkeit der Philosophie bezüglich des Begriffs *Ursache* [8, ebd.]. Zusammengefasst verneint Campbell die Möglichkeit, dass die Elemente eines Systems das System vollständig determinieren (aufwärtsgerichtete Kausalität) und mahnt an, dass das System immer auch seine Elemente determiniert (abwärtsgerichtete Kausalität). Selbstverständlich ist die Wahl, was unter einem gegebenen Gesichtspunkt als System bezeichnet wird, willkürlich, weswegen in einem vollständigen Zusammenhang allgemein von *höheren* und *niedrigeren* Ebenen gesprochen werden kann. Nach Campbell müssen dann sämtliche Vorgänge auf niedrigeren Ebenen mit den Gesetzen auf höheren Ebenen vereinbar sein, weshalb die höheren Ebenen eine Wirkung auf die niedrigeren Ebenen haben müssen. Für die Gegebenheiten in der uns bekannten Natur lassen sich Ebenen mit Wirkungen auf darunterliegende Ebenen wie beispielhaft in Abb. 10 dargestellt finden.



**Abbildung 10:** Abwärtsgerichtete Kausalität mit mehreren Ebenen, zusammengefügt aus [J], [K], [L], [M]

---

Zur Illustration von abwärtsgerichteter Kausalität wie in Abb. 10 ist noch ein konkretes Beispiel gegeben. Ein Mensch betreibt Sport (erste Ebene). Um den erhöhten Energiebedarf des Körpers zu decken, werden Fettsäuren in den Zellen des braunen Fettgewebes oxidiert (zweite Ebene). Die Oxidation der Fettsäuren entspricht einem chemischen molekularen Prozess (dritte Ebene). Dabei werden die Bindungen der einzelnen Atome verändert, das heißt die Ladungsverteilung der Elektronen in den Atomen ändert sich (vierte Ebene). Es wirkt also jede Ebene kausal auf die darunter liegenden Ebenen.

---

## 5.2 Ausbau durch George Ellis

---

Die aktuellsten und modernsten Ansätze zur Beschreibung von Naturvorgängen mit abwärtsgerichteter Kausalität stammen von George Ellis. Bei Ellis beinhalten Modelle sowohl aufwärtsgerichtete als auch abwärtsgerichtete Kausalität, sowie eine neu eingeführte Form, die Kausalität innerhalb einer Ebene, sodass sich unter Anderem auch emergente Eigenschaften ergeben. Im Folgenden wird der Gedankengang von Ellis, nach einer Motivation beginnend, bei seiner Definition für Kausalität im Allgemeinen, über die Unterscheidung von Kausalitäten verschiedener Richtungen zwischen Ebenen und deren präzisen Beschreibung, bis hin zur Ausdifferenzierung von abwärtsgerichteter Kausalität in fünf Erscheinungsformen nachvollzogen.

---

### 5.2.1 Kritik an der gewöhnlichen Auffassung von Kausalität in der Physik

---

Ellis positioniert sich als klarer Gegner zu dem gängigen Verständnis von Kausalität in der Physik. Im modernen Theoriegebäude der Physik unterscheiden sich die parallel existierenden Theorien in ihrem Geltungsbereich, welcher durch einen gewissen Bereich in Größenordnungen gegeben ist. So findet die allgemeine Relativitätstheorie auf großen Skalen in Größenordnungen von über  $10^{10}$  m Anwendung, die klassische Physik in der gewohnten Größenordnung von Metern und die Quantenmechanik auf sehr kleinen Skalen in Größenordnungen unter  $10^{-10}$  m [9, S. 2] und bei der Extrapolation einer Theorie über ihre gewöhnliche Größenordnung hinaus ergeben sich nach dem Korrespondenzprinzip die Aussagen der dafür vorgesehenen Theorie. Letzteres wurde bereits bei der Quantenmechanik beobachtet, da die quantenmechanischen Erwartungswerte nach dem Ehrenfest'schen Theorem den klassischen Resultaten entsprechen [13, S. 219]. Ähnliches zeigt sich im intuitiven Alltagsverständnis. Möchte man beispielsweise einem Mechanismus in einer Maschine auf den Grund gehen, zerlegt man die Maschine in seine Einzelteile und erschließt sich deren Funktion aus der Betrachtung der Einzelteile auf einer in Größenordnungen niedrigeren Ebene. Generell scheint sich das Verständnis für ein System von selbst zu ergeben, wenn die Kenntnis über dessen Elemente vollständig ist. Aus dieser Sicht lautet die logische Folgerung, dass Elemente eine kausale Wirkung auf ihr System ausüben. Angewandt auf die Physik und die nach Größenordnungen sortierten Theorien bedeutet dies, dass Kausalität von mikroskopischen zu makroskopischen Skalen, also aufwärtsgerichtet gedacht werden muss. Nach dieser Auffassung ist eine beliebige physikalische Theorie vollkommen auf eine ihr in Größenordnungen untergeordnete Theorie reduzierbar (die Vertreter dieses Ansatzes nennen sich passenderweise *Reduktionisten*), sodass letztlich nur die Theorie auf fundamentalster Ebene überhaupt eine Theorie ist und alle anderen Theorien nur aus ihr abgeleitet sind [9, S. 1].

Ellis lehnt die Möglichkeit einer vollkommen reduktionistischen und ausschließlich aufwärtsgerichtete Kausalität beinhalten- de Sichtweise auf die Physik ab, er schreibt dazu „*thus my theme is that the foundational assumption that all causation is bottom up is wrong, even in the case of physics*“ [9, ebd.]. Seine Gegenposition begründet er mit einer Reihe an Gegenbeispielen, in welchen Effekte durch abwärtsgerichtete Kausalität und Emergenz zu beobachten sind und folgert daraus, dass eine alleinige Beschreibung durch aufwärtsgerichtete Kausalität nicht ausreichend ist. Davon ausgehend ergänzt er letztere um abwärtsgerichtete Kausalität und Kausalität innerhalb einer Ebene, um sämtliche Naturvorgänge zu fassen [11, S. 1-2].

---

### 5.2.2 Definition von Kausalität und Folgerungen

---

#### Definition von Kausalität

Ellis wählt eine einfach zu handhabende Definition für kausale Abhängigkeit. Jene ist gegeben durch [9, S. 1]

**Causal Effect:** *If making a change in a quantity X results in a reliable demonstrable change in a quantity Y in a given context, then X has a causal effect on Y.*

An dieser Stelle sei bereits angemerkt, dass diese Definition nach den philosophischen Überlegungen zu Kausalität in Abschnitt 4.1 nicht konform zu den modernen Definitionen ist und wichtige genannte Aspekte vollkommen außer Acht lässt. Trotzdem erweist sie sich im Folgenden als praktikabel und darf erstmal akzeptiert werden.

Als Beispiel wählt Ellis den Umstand, dass nach Drücken der Taste 'A' auf einer Tastatur eines Computers der Buchstabe 'A' auf dem Bildschirm angezeigt wird [9, ebd.]. Dies macht deutlich, was im Alltagsverständnis nach Ellis als Ursache aufgefasst wird, nämlich die beobachtbare Änderung einer Größe nach der Änderung einer korrelierten Größe unter ansonsten gleichbleibenden Bedingungen in einem gegebenen Kontext.

---

---

### Kontextabhängigkeit von Ursachen

Offensichtlich sind Ursachen kontextabhängig, da sie nur in einer bestimmten Menge von Kontexten überhaupt als Ursachen identifizierbar sind. Damit müssen Ursachen immer relativ zu einem gegebenen Kontext beschrieben werden. Ellis verdeutlicht dies mit der Erweiterung des vorigen Beispiels. Allgemein kommen als Ursache für das Erscheinen des Buchstaben 'A' auf dem Bildschirm verschiedenste Umstände in Frage, angefangen bei den physikalischen Gesetzen zur Beschreibung der Funktionsweise des Computers, über die laufende Software, bis zu der Eingabe eines beliebigen Buchstabens. Im Kontext des Benutzers ändern sich die physikalischen Gesetze während der Benutzung jedoch nicht, so dass sie per Definition keiner Ursache im Kontext des Benutzers entsprechen [9, ebd.].

### Kausalität als Generator von Existenz

Um die Konsistenz der bisherigen Überlegungen zu wahren, muss angenommen werden, dass der kausale Einfluss einer existierenden physikalischen Entität auf eine Entität deren Existenz sichert. Passenderweise lässt sich Existenz definieren zu [9, S. 3]

**Existence:** *If Y is a physical entity made up of ordinary matter, and X is some kind of entity that has a demonstrable causal effect on Y as per Definition [Causal Effect], then we must acknowledge that X also exists (even if it is not made up of such matter).*

Somit kann Kausalität als Generator von Existenz angesehen werden.

---

### 5.2.3 Dynamische und undynamische Ursachen

Um Missverständnisse bezüglich des Wirkungsbereichs von abwärtsgerichteter Kausalität wie die scheinbar fehlende Abgeschlossenheit physikalischer Systeme unter dem Gesichtspunkt der Interaktion zu vermeiden, müssen zuerst Ursachen in *dynamische* und *undynamische* Ursachen differenziert werden [11, S. 5]. Dynamische Ursachen unterscheiden sich von undynamischen Ursachen durch ihre Möglichkeit effektive kausale Wirkungen auf der gleichen Ebene zu vermitteln. Beispielsweise kann ein bewegter Ball als dynamische Ursache für die Bewegung eines anderen Balles mit der exakt gleichen Geschwindigkeit nach einem voll-elastischen Stoß aufgefasst werden. Ein effektiver kausaler Prozess ist damit durch einen Austausch von physikalischen Größen charakterisiert und findet auf einer Ebene und nicht zwischen Ebenen statt. Dynamische Ursachen können nochmal in kausal effiziente Ursachen und kausal zirkuläre Ursachen unterschieden werden. Für Ersteres wurde bereits das Beispiel des Stoßvorganges genannt. Kausal zirkuläre Ursachen treten beispielsweise in chemischen Prozessen auf, welche sich selbst katalysieren. Komplettiert wird ein kausaler Prozess durch undynamische Ursachen, welche keine effektiven kausalen Wirkungen zeigen, dafür aber den kausalen Prozess unterstützen oder Möglichkeiten für effektive kausale Wirkungen bereitstellen. Sie werden ebenfalls in zwei Typen unterschieden, welche an das Verständnis von Kausalität bei Aristoteles angelehnt sind, vgl. [10, S. 132]. Zum einen Materialursachen, welche ermöglichende Bedingungen für Prozesse und Entitäten auf höheren Ebenen wie beispielsweise physikalische Prozesse, welche chemische Prozesse ermöglichen, darstellen, und zum anderen Formursachen, welche einschränkende Bedingungen durch den Kontext sind, wie es im vorigen Abschnitt zu sehen war [11, S. 5].

Mit dieser Ausdifferenzierung des Begriffs Ursache in dynamische und undynamische Ursachen, welche bedingenden, unterstützenden und/oder letztendlich verursachenden kausalen Einfluss haben, kann der Kausalitätsbegriff zwischen und innerhalb von Ebenen diskutiert werden.

---

### 5.2.4 Drei Arten von Kausalität zwischen und auf Ebenen

Wie bereits erwähnt, besteht die häufig in den Naturwissenschaften anzutreffende Meinung über Kausalität darin, dass Kausalität zwischen Ebenen der Abstraktion stets aufwärtsgerichtet agiert (vgl. Abb. 11 (a)). In Fällen, in denen diese Annahme unter gegebenen aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen nicht zu halten ist, kann dann davon ausgegangen werden, dass sich dies in Zukunft in kausal aufwärtsgerichtete Strukturen auflöst, so dass physikalische Vorgänge von Grund auf kausal aufwärtsgerichtet gedacht werden müssen [11, S. 1-2].

Dem tritt Ellis mit einem dynamischen Verständnis von Kausalität entgegen. Zwar existieren kausal aufwärtsgerichtete (bottom-up) Strukturen, wobei Prozesse auf einer niedrigen Ebene die Ergebnisse von Prozessen auf einer hohen Ebene kausal beeinflussen, jedoch müssen diese um abwärtsgerichtete (top-down) Kausalität (vgl. Abb. 11 (b), gelbe Pfeile), bei welcher die Ergebnisse von Prozessen auf der hohen Ebene auch bei Änderungen auf der niedrigen Ebene identisch bleiben, und Kausalität innerhalb einer Ebene (same-level) (vgl. Abb. 11 (b), rote Pfeile), die als tatsächliche dynamische Ursache fungiert, ergänzt werden [11, S. 2-3]. In Analogie zur Abb. 11 wird von einer hohen, einer mittleren und einer niedrigen Ebene gesprochen, wohl wissend, dass oftmals viele hohe und niedrige Ebenen vorhanden sind, welche in dieser Betrachtung nur der Anschaulichkeit halber zu genau einer reduziert werden. Weiterhin kann abwärtsgerichtete und aufwärtsgerichtete Kausalität dabei passenderweise als *Interkausalität* und Kausalität innerhalb einer Ebene als *Intrakausalität* bezeichnet werden.



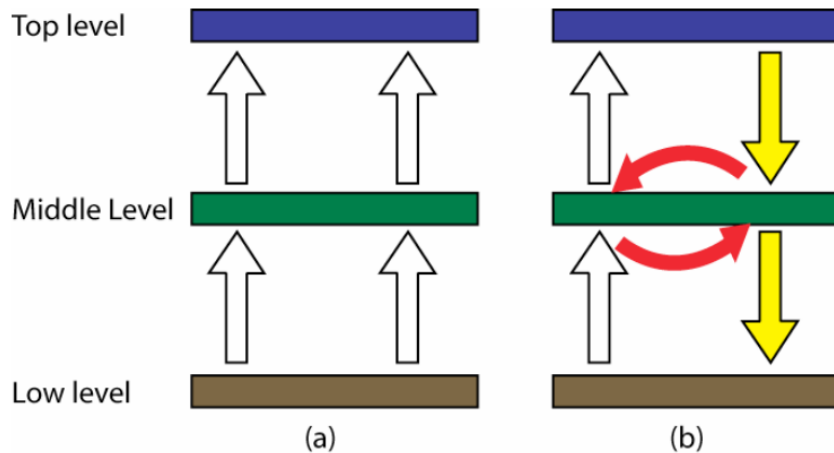


Abbildung 11: Arten von Kausalität zwischen Ebenen [11, S. 2]

Um das Zusammenspiel dieser drei Arten von Kausalität zwischen Ebenen zu verstehen, müssen sie zuerst ausreichend definiert und beschrieben werden.

#### Abwärtsgerichtete Kausalität

Ellis stellt heraus, dass kausal abwärtsgerichtete Effekte dann zum Tragen kommen, wenn eine Änderung von Bedingungen auf der hohen Ebene auch eine Änderung von Prozessen der niedrigen Ebene hervorruft [10, S. 128]. Prozesse der niedrigen Ebene erweisen sich dann als kontextabhängig von der hohen Ebene. Dabei muss beachtet werden, dass viele unterschiedliche Zustände der niedrigen Ebene zu gleichen Zuständen auf der hohen Ebene führen. Die entsprechenden Zustände auf der niedrigen Ebene werden daher in einer *Äquivalenzklasse* zusammengefasst. Beispielsweise führen viele verschiedene Mikrozustände eines Gases zum gleichen Makrozustand, also zum Beispiel zur gleichen Temperatur. Die Formulierung von Äquivalenzklassen ermöglicht es ein weiteres Charakteristikum von abwärtsgerichteter Kausalität herauszuarbeiten. Bei einem Prozess führt der gleiche Initialzustand zum gleichen Finalzustand auf der hohen Ebene, unabhängig von den korrelierten Zuständen auf der niedrigen Ebene. Wenn im Gegenteil verschiedene Finalzustände auf der hohen Ebene durch verschiedene Realisierungen auf der niedrigen Ebene des gleichen Zustands auf der hohen Ebene generiert werden, darf offensichtlich nicht von abwärtsgerichteter Kausalität gesprochen werden. Für physikalische Systeme der makroskopischen Größenordnung kann größtenteils davon ausgegangen werden, dass sie aus so vielen mikroskopischen Elementen aufgebaut sind, dass genügend Äquivalenzklassen vorhanden sind und damit auch abwärtsgerichtete Kausalität auftritt. Um allgemein kausal abwärtsgerichtete Strukturen zu finden, muss also nach Äquivalenzklassen auf der niedrigen Ebene gesucht werden. Des Weiteren ändert abwärtsgerichtete Kausalität die kausalen Relationen der darunter liegenden Ebenen. Die Variablen der niedrigen Ebene werden abhängig von den Anfangs- und Randbedingungen der hohen Ebene, sodass abwärtsgerichtete Kausalität Einschränkungen für tiefere Ebenen mit sich bringt [10, ebd.].

#### Aufwärtsgerichtete Kausalität

Im Gegensatz zur abwärtsgerichteten Kausalität tritt bei aufwärtsgerichteter Kausalität eine Beeinflussung der Finalzustände der hohen Ebene durch unterschiedliche korrelierte Zustände der niedrigen Ebene auf. Für diese Fälle kann ein Ergebnis der hohen Ebene durch Reduktion auf die Prozesse der niedrigen Ebene erklärt werden. Weiterhin bietet aufwärtsgerichtete Kausalität Möglichkeiten für die niedrige Ebene, da unterschiedliche Mikrozustände auch zu unterschiedlichen Makrozuständen führen und die Anfangs- und Randbedingungen der niedrigen Ebene kausalen Einfluss ausüben können [10, S. 126-127] [11, S. 1-3].

#### Kausalität innerhalb einer Ebene

Durch Kausalität innerhalb einer Ebene oder Intrakausalität hervorgerufene Ursachen sind den dynamischen Ursachen zuzuordnen. Jene können sich zirkulär oder effektiv artikulieren, der erste Fall ist in Abb. 11 (b) durch rote Pfeile dargestellt. Wohingegen abwärts- und aufwärtsgerichtete Kausalität Möglichkeiten und Bedingungen für einen physikalischen Prozess auf den jeweiligen Ebenen generieren, werden mit Intrakausalität die unmittelbaren Ursachen auf einer Ebene des Prozesses beschrieben. Die Dynamik eines Prozesses findet also auf der Ebene selbst statt, ist aber an den statischen kausalen Einfluss der anderen Ebenen gebunden [10, S. 127, 132].

---

### **Kombination aller drei Arten von Kausalität zwischen und auf Ebenen**

Um einen physikalischen Prozess vollständig beschreiben zu können, werden alle drei Arten von Kausalität zwischen und auf Ebenen benötigt. Abwärts- und aufwärtsgerichtete Kausalität ermöglichen und bedingen Intrakausalität, sodass komplexe emergente Strukturen hervortreten können. Variablen und Bedingungen der niedrigen und hohen Ebene beeinflussen stetig die Variablen der mittleren Ebene, auf welcher kausale Prozesse ablaufen können.

Obwohl diese Betrachtung konsistent erscheint, ergibt sich eine unmittelbare Frage. Wenn physikalische Gesetze deterministisch sind, wie können dann Freiheitsgrade auf der hohen Ebene für abwärtsgerichtete Kausalität entstehen? Dies muss kein Widerspruch sein, da zwar sämtliche Teile eines physikalischen Systems in physikalischen Begriffen beschrieben werden können, die genaue Struktur des Systems kann jedoch von anderen Einflüssen abhängen. Beispielsweise können Transistoren, elektrische Ströme und Kabel in der Physik beschrieben werden, jedoch ist deren Verkabelung zu einem Computer davon ausgenommen. Die Dynamik der niedrigen Ebene wird durch die Randbedingung eines Computers eingeschränkt, so dass beispielsweise die Fließrichtung des Stroms in einem Kabel vorgegeben ist. So erfolgt zwar die Beschreibung des elektrischen Stromes nach wie vor in deterministischen Begriffen, doch offenbar existiert ein davon unberührter kausaler Einfluss des Systems auf seine Teile [10, S. 134].

Zusammenfassend ist also zu sagen, dass immer alle drei Arten von Kausalität zwischen und auf Ebenen gleichzeitig auftreten und dieses Zusammenspiel das Entstehen von komplexen Strukturen ermöglicht.

---

#### **5.2.5 Fünf Arten von abwärtsgerichteter Kausalität**

---

In seinen weiteren Ausführungen werden bei Ellis fünf grundlegende Arten von abwärtsgerichteter Kausalität differenziert, welche ihre Daseinsberechtigung alle durch ein Beispiel erhalten [10, S. 128].

##### **1. Algorithmische abwärtsgerichtete Kausalität**

Im ersten Fall ist ausschließlich die Struktur der hohen Ebene, mitsamt ihren Rand- und Anfangsbedingungen, für das Ergebnis eines Prozesses von Belang. Dies ist möglich, wenn die Variablen der hohen Ebene die Dynamik der niedrigen Ebene kausal determinieren. Dann sind auch die Variablen der niedrigen Ebene vollständig kausal von den Anfangsbedingungen der hohen Ebene abhängig. Von beliebigen Anfangsbedingungen auf der niedrigen Ebene ausgehend wird dort das Ergebnis eines Prozesses algorithmisch generiert, wobei andere Anfangsbedingungen das Ergebnis ändern würden, und durch eine ebenfalls algorithmische Wechselwirkung auf die hohe Ebene transformiert. Das Ergebnis auf der hohen Ebene hängt wiederum von den dortigen Rand- und Anfangsbedingungen ab. Offensichtlich ist es nicht möglich, dies alleine durch die Eigenschaften der niedrigen Ebenen zu beschreiben, da jene nur durch Variablen der hohen Ebene determinierte Ergebnisse liefern, welche auf der hohen Ebene ausschließlich durch den Kontext der dortigen Variablen zu einem Ergebnis führen, sodass insgesamt nur die hohe Ebene das Ergebnis determiniert [10, S. 128-129].

Ein intuitives Beispiel für algorithmische abwärtsgerichtete Kausalität ist ein Computer. Das Innenleben eines Computers besteht beispielsweise aus vielen Schaltkreisen, welche Transistoren verbinden. Diese genaue Verbindung von Transistoren ergibt sich durch die auf einen Computer abgestimmte Anordnung. Letztere ist das Produkt von Überlegungen aus der Elektro- und Informationstechnik und lässt sich offensichtlich nicht aus der die Transistoren bestimmenden Dynamik von fließenden Elektronen extrahieren. Somit generiert jene Dynamik zwar algorithmisch die Funktion eines Transistors und damit auch letztlich die des Computers, jedoch entsteht dieser Computer erst durch eine bestimmte Anordnung der Transistoren [10, S. 129].

##### **2. Abwärtsgerichtete Kausalität via Regelung durch nicht-adaptive Information**

In einem System, welches sich selbst durch nicht-adaptive Information regelt, werden die Elemente der niedrigen Ebene durch die Elemente der hohen Ebene beeinflusst, sodass sich auf der hohen Ebene ein gewünschter Zustand einstellt. Jener Zustand ist unabhängig von den Anfangsbedingungen auf der hohen Ebene und wird durch die selbstregulatorische Verringerung der Differenz zwischen Anfangszustand und gewünschtem Zustand erreicht. Das Ergebnis hängt damit einzig und allein von dem zu Beginn vorgegebenem gewünschtem Zustand ab, weshalb die Dynamik der niedrigen Ebene, welche diesen Zustand herbeiführen soll, kausal von eben jenem, welcher auf der hohen Ebene implementiert wurde, abhängt [10, ebd.].

Zwar findet sich abwärtsgerichtete Kausalität via Kontrolle durch nicht-adaptive Information nicht in der Physik wieder, dafür aber beispielsweise in den Ingenieurwissenschaften oder in der Biologie. In biologischen Systemen wird der gewünschte Zustand aus einem Ensemble an Zuständen durch die natürliche Selektion herausgefiltert, womit die natürliche Selektion kausalen Einfluss auf das Überleben bestimmter Arten hat. Ein Beispiel aus dem Maschinenbau ist das Thermostat. Jenes regelt die Temperatur eines Raums auf eine durch den Benutzer vorgegebene Temperatur, wodurch die Eingabe des Benutzers die thermischen Vorgänge auf mikroskopischer Ebene in einer an das Thermostat angeschlossenen Heizung kausal beeinflusst [10, ebd.].

---

### 3. Abwärtsgerichtete Kausalität via adaptiver Selektion

Adaptive Selektion kann bei der Interaktion von vielen Elementen in einem System auftauchen, wenn bestimmte Variationen dieser Elemente in einem gegebenen Kontext durch jenen selektiert und andere Variationen verworfen werden. Der Kontext des Systems entspricht der hohen Ebene, welcher Nischen für entsprechende Elemente auf der niedrigen Ebene bereithält. Die Selektion basiert auf einem Kriterium, welches vom System selbst gesetzt wurde, weshalb die Selektion adaptiv ist, sodass Variationen aussortiert oder in die Nischen eingeordnet werden. Die übrigbleibenden Variationen unterwerfen sich dann erneut einem adaptiven Variationsprozess, welcher durch ein anderes Kriterium bestimmt sein kann. In diesem Fall existiert eine abwärtsgerichtete Kausalität vom Kontext auf das System. Bestimmte Variationen der Elemente werden durch Nischen und das zugehörige Kriterium der Selektion favorisiert, weshalb eine Änderung dieser Variablen eine Änderung des Ergebnisses bewirkt. Eine verschiedene Struktur auf der niedrigen Ebene führt also nur bei gleichzeitiger Variation der hohen Ebene zu einem unterschiedlichen Ergebnis. Offenbar unterscheidet sich adaptive Selektion von der Kontrolle durch nicht-adaptive Information dadurch, dass das Ergebnis nicht vorgegeben, geschweige denn vorhersagbar ist, da der genaue Selektionsprozess den absoluten Zufall enthält. Letzteres ermöglicht das Aufkommen zu Anfangs nicht vorhandener Information, womit emergente Eigenschaften auftauchen [10, ebd.].

Emergenz und adaptive Selektion sind wesentliche Charakteristika von Leben. Dies betrifft Zellen genauso wie Menschen und Tiere. Die Evolutionstheorie nach Darwin sieht vor, dass die Individuen einer Art einem Selektionsdruck durch die Natur unterworfen sind. Unter jenem erweisen sich Gruppen von Individuen als überlebensfähig, andere hingehen nicht. Die Variation zwischen diesen Individuen ist durch eine veränderte DNA gegeben, welche der mikroskopischen Größenordnung entspricht. Der Selektionsdruck auf makroskopischer Ebene wählt Individuen mit bestimmter DNA aus, womit er kausal abwärtsgerichteten Einfluss auf die DNA der mikroskopischen Ebene ausübt [10, S. 129-130].

### 4. Abwärtsgerichtete Kausalität via Regelung durch adaptive Information

Dieser Fall entspricht einer abgewandelten Kombination der letzten beiden Fälle. Ein System generiert ein Ergebnis durch Regelung, jedoch ist dieses Ergebnis nicht durch einen äußeren Einfluss wie im zweiten Fall vorgegeben, sondern unterliegt einer adaptiven Selektion des Systems. Damit ist das von der Regelung angestrebte Ergebnis dynamisch im Kontext der Selektion und nicht auf das Zusammenspiel der Elemente des Systems reduzierbar. Das System kann sich also selbst erkennen und nach diesen Informationen vorteilhaft anpassen, um ein gewünschtes Resultat zu erreichen. Da bereits generierte Information ebenfalls im Kontext enthalten ist, erweisen sich etwaige Systeme als lernfähig. Die Dynamik des Prozesses wird hauptsächlich vom Kriterium der Selektion determiniert, was einer abwärtsgerichteten Kausalität vom Kontext auf das sich selbst regulierende System entspricht [10, S. 130].

Ein Beispiel für Regelung durch adaptive Selektion ist das Training eines Muskels. Benötigt ein Individuum in einer bestimmten Umgebung mehr Kraft als es zur Verfügung hat, existiert ein erwünschtes Ergebnis. Dazu wird der Muskel stimuliert und dadurch gestärkt, wobei die Stärkung einer abwärtsgerichteten Kausalität vom die Situation erkennenden Gehirn auf die Muskelzellen entspricht, bis das Ergebnis erreicht ist. Da jede Stimulation den Muskel verändert, wird neue Information generiert, sodass die Stimulation selbst verändert werden muss, bis das angestrebte Resultat erreicht wird. Eine Änderung der Umgebung zu einer Umgebung, in welcher weniger Kraft benötigt wird, ändert den Kontext in die andere Richtung. Die fehlende Stimulation lässt den Muskel schrumpfen, da das Training aufgrund nicht festgestellter Notwendigkeit durch das Gehirn eingestellt wurde [10, ebd.].

### 5. Intelligente abwärtsgerichtete Kausalität

Im letzten Fall wirkt abwärtsgerichtete Kausalität in einem von Intelligenz geprägten System. Jenes ist charakterisiert durch die Fähigkeit von Regelung durch adaptive Selektion auf die Weise, dass die Selektion der präferierten Ergebnisse durch Abstraktionen stattfindet. Die Abstraktionen repräsentieren von Individuen gedachte strukturierte Objekte und sind beliebig wählbar. Abwärtsgerichtete Kausalität ist in diesen Systemen nur dann möglich, wenn die Individuen den Abstraktionen gleichen Wert beimessen, sodass jene über ihre Bedeutung für die Individuen kausal auf eine niedrige Ebene wirken können [10, ebd.].

Ein auf den ersten Blick für diesen Abschnitt atypisches Beispiel ist Buchgeld. Es existiert materiell nicht und ist eine reine Abstraktion der Menschen. Weiterhin unterliegt Buchgeld einer gewissen Struktur, da ein monetärer Wert quantitativ durch eine Zahl ausgedrückt wird. Buchgeld kann kausal abwärtsgerichteten Einfluss üben, weil es gegen real existierende Objekte eingetauscht werden kann. So kann beispielsweise ein Haus gebaut werden, wobei sich auf mikroskopischer Ebene die chemische Zusammensetzung von Baumaterialien verändert, zum Beispiel beim Anrühren von Zement. Der kausale Einfluss von Buchgeld ist wie gefordert nur durch die zu Grunde gelegte Abstraktion der Menschen möglich und kann daher nicht auf eine Entität reduziert werden. Da außerdem der genaue Wert von Geld durch die Interaktion der Menschen und den Objekten, dessen Wert durch Geld repräsentiert ist, dynamisch ist, regelt sich das System aus Buchgeld und Mensch durch adaptive Selektion selbst. Bestimmte Preise werden durch den Druck des Handels akzeptiert, andere verworfen, womit die Struktur der Abstraktion Buchgeld eine Eigendynamik aufweist, welche einer Regelung durch das Zusammenspiel vieler Individuen unterworfen ist [10, S. 131].

---

## 5.2.6 Beispiel aus der Quantenphysik: Bändermodell

---

Makroskopische Eigenschaften von Metallen wie beispielsweise die für ein Metall spezifische elektrische Leitfähigkeit können mit dem Bändermodell beschrieben werden. Im Bändermodell besitzt das Metall eine periodische Gitterstruktur, welche durch Phononen beschriebene Gitterschwingungen und Zustände von Elektronen in der Bandstruktur ermöglicht. Also sind die Gittereigenschaften des Metalls eine Voraussetzung für die Beschreibung seiner Bestandteile und üben damit kausalen Einfluss aus. Offenbar ist das periodische Gitter im Metall von einer deutlich höheren Größenordnung als die Elektronen, sodass der eben festgestellte kausale Einfluss von abwärtsgerichteter Natur sein muss. Denn es ist nicht möglich, die makroskopischen Eigenschaften des Metalls alleine durch die Zustände der Elektronen zu beschreiben, es muss immer auf die höhere Ebene der Bandstruktur zurückgegriffen werden. Effekte wie Supraleitfähigkeit sind nicht durch die Zustände einzelner Elektronen beschreibbar, dies muss durch die Bildung von Cooper-Paaren im periodischen Gitter ergänzt werden. Das Bändermodell ist also ein Beispiel für abwärtsgerichtete Kausalität von der Band- beziehungsweise Gitterstruktur auf die Zustände der einzelnen Elektronen [9, S. 3-4].

---

## 5.3 Anwendung von abwärtsgerichteter Kausalität auf den quantenmechanischen Messprozess

---

Mit den vorangestellten Überlegungen kann zuletzt das Konzept der abwärtsgerichteten Kausalität auf den quantenmechanischen Messprozess angewandt werden, wobei die Kompatibilität mit den Interpretationen aus Kapitel 3, den Gedankenexperimenten aus Abschnitt 2.4 und den philosophischen Überlegungen aus Abschnitt 4.1 überprüft werden soll.

---

### 5.3.1 Abwärtsgerichtete Kausalität in der Physik

---

Die Anwendung führt über das Auftauchen von abwärtsgerichteter Kausalität in der Physik im Allgemeinen. Da die Physik in theoretische und experimentelle Physik differenziert wird, kann die allgemeine Anwendung getrennt auf die beiden Disziplinen erfolgen, wie Ellis es in zwei Beispielen beschreibt.

#### **Abwärtsgerichtete Kausalität in der Theorie der Physik**

Seine Überlegungen stützt Ellis auf ein Beispiel, die Theorie des Elektromagnetismus von Maxwell. Jene fußt wie im Abschnitt 4.3 bereits genannt auf den vier Maxwell-Gleichungen. Historisch wurden dadurch zahlreiche Erfindungen ermöglicht, beispielsweise das Radio oder der Fernseher. Die Theorie selbst stellt dabei keine physikalische Entität dar, sondern ein abstraktes gedankliches Konstrukt, welches auf verschiedene Arten (z.B. niedergeschrieben in einem Manuskript) und Formalismen (z.B. mit dreidimensionalen Vektoren) präsentiert werden kann. Die verschiedenen Darstellungsmöglichkeiten bilden dann eine Äquivalenzklasse, womit die erste Voraussetzung für abwärtsgerichtete Kausalität erfüllt ist. Die kausal effektive Wirkung der Theorie artikuliert sich dann, wenn sie benutzt wird, um Gegenstände wie das Radio zu entwickeln und zu konstruieren, da dies eine echte Veränderung an realen Objekten darstellt. Ohne die Theorie wäre das Radio nicht gebaut worden und dessen Atome hätten sich auf eine andere Art und Weise angeordnet [10, S.133]. Eine Theorie liefert also eine Beschreibung der physikalischen Welt, welche bei hinreichender Genauigkeit kausal effektiv wirken kann. Offensichtlich ist die Genauigkeit der Theorie eine weitere Voraussetzung für abwärtsgerichtete Kausalität, da sonst die Konstruktion von funktionalen Gegenständen nicht gelingen wird. Die Anpassung und Veränderung der Theorie durch den Menschen entspricht einem Regelungsprozess, welcher unter adaptiver Selektion stattfindet, da die Theorie im Experiment auf den Prüfstand gestellt und falsifiziert werden kann [10, S. 133-134]. Darüber hinaus findet die Selektion zwischen verschiedenen Theorien, also verschiedenen Abstraktionen statt, wobei das Prüfen selbst eine Abstraktion ist, womit es sich nach den Überlegungen im vorigen Abschnitt um intelligente abwärtsgerichtete Kausalität handelt und neben der abwärtsgerichteten Kausalität auch die anderen beiden Arten von Kausalität mit der Prüfung im Experiment und der Anpassung durch den Menschen identifiziert werden können.

Um die kausale Effektivität zu garantieren, wird eine Annahme benötigt, die prinzipiell in der Physik benötigt wird, um sie effektiv zu gestalten, nämlich die Annahme, dass die physikalischen Gesetze in jedem Raumzeitpunkt, also überall und zu einer beliebigen Zeit, für jeden Beobachter identisch sind. Nur wenn dieses Prinzip greift, kann eine Theorie gebildet und angewandt werden. Es ist also außerdem die raumzeitliche Konstanz der Gesetzmäßigkeit, welche Kausalität von Theorien auf reale Objekte ermöglicht [10, S. 134].

#### **Abwärtsgerichtete Kausalität im Experiment der Physik**

Ähnlich verhält sich in einem physikalischen Experiment. Als Beispiel nennt Ellis den Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider (Kurz: LHC), an welchem die Resultate von Kollisionen von Teilchen untersucht werden. Beim Stoß zweier subatomarer Teilchen entstehen neue Teilchen, was im Rahmen verschiedener physikalischer Theorien beschrieben wird, womit die physikalische Theorie wie zuvor beschrieben kausal abwärtsgerichteten Einfluss hat. Parallel dazu sind auch die anderen Arten von Kausalität anzutreffen. Intrakausalität findet sich im geregelten Betrieb des Beschleunigers, dass zum Beispiel die Aufnahme von Messdaten kurz vor der Inbetriebnahme gestartet wird, abwärtsgerichtete Kausalität artikuliert sich durch Kontextabhängigkeit in der expliziten Konstruktion des Beschleunigers, welche unter einem abstrakten

---

Ziel, wie beispielsweise der Entdeckung des Higgs-Bosons, stattgefunden hat und die möglichen Prozesse auf subatomarer Ebene einschränkt.

Die Anwendung auf die Physik zeigt erneut, dass die Annahme einer einzigen Form von Kausalität in einem komplexen System, das die Physik zweifelsohne ist, nicht gerechtfertigt und unvollständig ist. Erst das gleichzeitige Zusammenspiel aller Arten von Kausalität kann sämtliche Vorgänge erfassen [10, S. 133].

---

### 5.3.2 Abwärtsgerichtete Kausalität im quantenmechanischen Messprozess

---

Die Quantenmechanik ist eine Theorie der Physik, sodass allgemein die Überlegungen aus dem vorigen Abschnitt gelten, womit insbesondere im quantenmechanischen Messprozess abwärtsgerichtete Kausalität zu finden sein muss. In der Terminologie des Heisenbergschen Messprozesses (vgl. Abschnitt 2.2) beginnt der quantenmechanische Messprozess mit der Präparation des Zustandes eines Messobjekts, darauf folgt die Wechselwirkung und anschließend die Registrierung. Beim Messproblem war zu sehen, dass bei der Registrierung eine Art Selektion von Eigenzuständen aus einer Superposition aus eben jenen stattfindet (vgl. Abschnitt 2.3). Zu dieser Selektion äußerte sich ebenfalls George Ellis.

#### **Selektion von Zuständen im quantenmechanischen Messprozess bei Ellis**

In jedem Experiment muss ein Zustand entweder eigenhändig präpariert oder als präpariert angesehen werden. Durch die folgende Wechselwirkung ist es möglich, dass Superpositionen von Eigenzuständen entstehen, wobei bei der Registrierung eine Selektion von bestimmten Eigenzuständen stattfindet. Diese Selektion ist ein nicht-unitärer Prozess, da die explizite Wahl des registrierten Eigenzustandes zufällig erscheint. Trotzdem erfolgt die Beschreibung der Dynamik im Rahmen der Quantenmechanik, die Zeitentwicklung ist also durch die Schrödinger-Gleichung beschrieben, welche zweifelsfrei unitär ist. Sofort stellt sich die Frage nach der Kompatibilität dieser beiden Beschreibungen, welcher im Folgenden nachgegangen werden soll.

In einem Experiment ist ein System vor einer Messung durch eine Menge an Eigenzuständen  $\{|\psi_i\rangle\}$  beschrieben, aus dessen Linearkombination der präparierte Zustand gebildet werden kann. Der Übergang von einer Linearkombination von Zuständen zu einem Eigenzustand  $|\psi_i\rangle$  während der Wechselwirkung entspricht einer Selektion von gewissen Zuständen durch das Messgerät. Die Selektion kann auf zwei Arten stattfinden. Entweder werden die bei der Registrierung möglichen Eigenzustände durch den experimentellen Aufbau räumlich separiert, wie es beispielsweise beim Stern-Gerlach-Experiment der Fall ist, und anschließend durch das Messgerät selektiert, wobei die zeitliche Entwicklung der Zustände bis zum Zeitpunkt der Selektion unitär ist. Oder die Selektion von Zuständen erfolgt durch Absorption der verworfenen Eigenzustände, was mit einer Absorption von Energie wie beispielsweise bei einem einfachen Linearpolarisator einhergeht. In beiden Fällen führt die Selektion von Eigenzuständen des Systems durch das Messgerät zu einer nicht-unitären Zeitentwicklung des Systems, sodass dies nicht mit der Schrödinger-Gleichung beschrieben werden kann. Fasst man das klassische makroskopische Messgerät als hohe Ebene und das quantenmechanische mikroskopische System als niedrige Ebene auf, hat das Messgerät einen kausal abwärtsgerichteten und effektiven Einfluss auf die Zeitentwicklung der Zustände des Systems und unterbindet ihre Unitarität. Das makroskopische Kriterium, dass nur Eigenzustände beobachtbar sind, fungiert als Randbedingung für die subatomare Ebene und schränkt die Dynamik ein, sodass eine makroskopische Messung stets eine nicht-unitäre Dynamik auf der mikroskopischen Ebene hervorruft [9, S. 4].

#### **Folgerungen für die Kontextabhängigkeit von Messungen**

Aus diesen Überlegungen ergibt sich unmittelbar, dass die konkrete Realisierung des Experiments einen Kontext für die Messung setzt, welcher die Dynamik auf der mikroskopischen Ebene beeinflusst. Dass solch ein Einfluss existiert, wurde bereits bei der Welcher-Weg-Information am Doppelspalt in Abschnitt 2.4.4 deutlich. Ob das Photon als physikalische Entität Wellen- oder Teilchencharakter zeigt, hängt vom genauen Versuchsaufbau ab. Weiterhin kann der Gedanke von Bohr, dass das Experiment stets in Begriffen der klassischen Physik verstanden wird und daraus eine Spannung zu den stochastischen Begriffen der Quantenmechanik entsteht, präzisiert werden. Die Schrödinger-Gleichung ist unitär und damit auch die Quantenmechanik, nur der Messprozess an sich ist nicht unitär, da jener nicht unabhängig von der makroskopischen Vorstellung durchgeführt werden kann. Die Spannung entsteht also durch den Zwang des Kontextes für die Dynamik auf der mikroskopischen Ebene und ist darüber hinaus prinzipiell nicht behebbar. Solange also eine makroskopische Vorstellung im experimentellen Aufbau implementiert ist, findet eine nicht-unitäre Selektion von Eigenzuständen auf der mikroskopischen Ebene statt.

#### **Folgerungen für die raumzeitliche Vorstellung und Nicht-Lokalität in der Quantenmechanik**

Bohr sah die raumzeitliche Vorstellung und Kausalität als komplementär zueinander an, da die Rekonstruktion von kausalen Abfolgen in atomaren Prozessen nicht ohne deren Störung verlaufen kann (vgl. Abschnitt 3.1). Auf den ersten Blick scheint dies ein Gegenargument zu der bisherigen Argumentation zu sein. Dies entkräftet sich allerdings dadurch, dass die von Bohr angesprochene Kausalität im hiesigen Rahmen ausschließlich der Intrakausalität entspricht. Abwärts- und aufwärtsgerichtete Kausalität bleiben davon unberührt. Vielmehr lieferte Bohr selbst den Anhaltspunkt, dass eine Messung ein Akt von abwärtsgerichteter Kausalität ist, da jener eine Störung, also eine kausal effektive Wirkung erzielt,



---

was durch die raumzeitliche Vorstellung unterstützt wird, da erst jene die Unterscheidung von Größenordnungen und höheren und tieferen Ebene ermöglicht. Interkausalität ist also ein explizites Produkt der raumzeitlichen Vorstellung und demzufolge nicht komplementär dazu.

Weiterhin lassen sich unintuitive Aspekte der Quantenmechanik wie ihre Nicht-Lokalität als Effekte von abwärtsgerichteter Kausalität verstehen. In Abschnitt 2.4.3 wurde herausgearbeitet, dass die Quantenmechanik nicht lokal ist und Verschränkung von beispielsweise zwei Photonen zu nicht lokalen Effekten über große Distanzen führt. Verschränkung kann als ein Konzept auf einer hohen Ebene aufgefasst werden, welches kausal abwärtsgerichtet auf seine Elemente auf einer niedrigen Ebene wirkt. Der Kontext der Verschränkung entspricht der Randbedingung, dass die Teilsysteme eben nicht mehr separat betrachtet werden dürfen, womit die Dynamik jedes Teilsystems an die Dynamik des Gesamtsystems gebunden ist. Das Unintuitive an dieser Vorstellung verschwindet also bei der Berücksichtigung von Kontextabhängigkeit und Interkausalität.

### **Folgerungen anhand Schrödingers Katze und Wigners Freund**

Die Gedankenexperimente Schrödingers Katze (vgl. Abschnitt 2.4.1) und Wigners Freund (vgl. Abschnitt 2.4.2) sind ebenfalls ein Ausdruck von Selektion durch das Messgerät. In beiden Gedankenexperimenten wurde eine Superposition von Eigenzuständen auf der mikroskopischen Ebene auf die makroskopische Ebene übertragen, auf welcher keine solche Superpositionen existieren, da sie in klassischen Begriffen beschrieben wird. Der Transfer zwischen den Ebenen übernimmt das Geigersche Zählrohr, da es den mikroskopischen Zerfall eines radioaktiven Atoms in ein makroskopisches Ereignis, nämlich die Aktivierung eines Relais, übersetzt. Bereits an dieser Stelle selektiert das Geigersche Zählrohr und ändert die zeitliche Entwicklung des Zerfalls nicht-unitär, womit es kausal abwärtsgerichtet auf den Zerfall wirkt. Koppelt man die gesamte Stahlkammer an einen Beobachter, verhält es sich ähnlich. Erst durch die Beobachtung wird das Schicksal der Katze entschieden, womit die strenge Notwendigkeit von abwärtsgerichteter Kausalität deutlich wird. Unabhängig davon, ob die Katze vor der Messung vollständig durch eine Wellenfunktion beschrieben ist oder nicht, kann für den Beobachter verwendbare Information erst im Moment der Messung extrahiert werden. Die Messung ist damit prinzipiell ein Prozess, an welchem Kausalität beteiligt ist, da die Messung eine Ursache für die Extraktion von Information darstellt. Weiterhin artikuliert sich darin Kausalität abwärtsgerichtet, wenn dem Experiment Theorien zu Grunde liegen, welche die mikroskopische Ebene beschreiben. Der Umstand, dass ein Experiment aufgebaut worden ist, um einen Gegenstand der mikroskopischen zu untersuchen und Informationen aus der mikroskopischen Ebene zu extrahieren, führt unweigerlich zu kausalen Effekten auf der mikroskopischen Ebene, da verwertbare Information nie ohne eine Messung generiert werden kann.

### **Abwärtsgerichtete Kausalität in der Viele-Welten-Interpretation**

In den bisherigen Folgerungen wurde offensichtlich von der Kopenhagener Interpretation ausgegangen, sodass als nächstes die anderen Interpretationen in Betracht gezogen werden müssen. Die Selektion im Messprozess ergibt sich in der Viele-Welten-Interpretation durch die parallele Realisierung aller Messresultate in separierten Universen (vgl. Abschnitt 3.2). Die Anwendung von abwärtsgerichteter Kausalität gestaltet sich als schwierig, da ein übergeordnetes System existieren müsste, welches die parallelen Universen zusammenfasst, um kausal abwärtsgerichtete Wirkungen erzielen zu können. Dabei muss berücksichtigt werden, dass das übergeordnete System die Interaktion der Universen verbieten muss, da jedes Universum einen Eigenzustand repräsentiert und alle Eigenzustände orthogonal zueinander sind. Die Existenz eines solchen Systems ist zweifellos nicht im Sinne der Schöpfer der Viele-Welten-Interpretation, da der Kerngedanke die Separation der Welten ist und die Implementierung von abwärtsgerichteter Kausalität einer Vereinigung gleichkäme. Zwar ist nach wie vor eine Kontextabhängigkeit der möglichen Messresultate vom Messgerät und dem konkreten experimentellen Aufbau vorhanden, jedoch findet die Selektion auf einer Ebene außerhalb der makroskopischen Ebene statt, womit die kausale Wirkung nicht von abwärtsgerichteter Natur ist. Sie geht lediglich vom Umstand der parallelen Existenz der Welten aus, nicht aber von der parallelen Existenz der Welten an sich. Die Anwendung schlägt also nicht gänzlich fehl, sondern erweist sich als unpraktisch und wenig aufschlussreich. Die Viele-Welten-Interpretation erwies sich schon bei der Anwendung auf Schrödingers Katze als vorteilhaft und physikalisch ausreichend, sodass kein zwingender Anhaltspunkt für abwärtsgerichtete Kausalität gefunden werden kann.

### **Abwärtsgerichtete Kausalität in der Bohmschen Mechanik**

Die Bohmsche Mechanik ist charakterisiert durch eine völlig deterministische Zeitentwicklung bei Inkaufnahme von der Unkenntnis der Anfangsbedingungen, sodass die Zufälligkeit von der Selektion beim Messprozess auf die Unkenntnis der Anfangsbedingung verschoben wurde. Dies ermöglicht das effektive Wirken von abwärtsgerichteter Kausalität, da ein experimenteller Aufbau Einschränkungen an die Anfangsbedingungen und die zeitliche Entwicklungen darstellt, wobei die Unkenntnis der Anfangsbedingungen Raum für abwärtsgerichtete Kausalität schafft. Solange also ein zufälliges Element auf der mikroskopischen Ebene in der Beschreibung vorhanden ist, kann sich abwärtsgerichtete Kausalität artikulieren, womit die deterministischen Gleichungen der Bohmschen Mechanik keine Widersprüche mit sich bringen.



---

### Abwärtsgerichtete Kausalität und Dekohärenz

Die Grundidee der Dekohärenz, die Verschränkung eines Systems mit seiner Umgebung und eine daraus resultierende Störung des Systems (vgl. Abschnitt 3.4), beinhaltet explizit die Umgebung als Kontext für jedes System. Zwar stört das System die Umgebung, jedoch ist das System immer in seine Umgebung eingebettet, sodass das bloße Vorhandensein einer Umgebung eine Randbedingung darstellt, welche die Dynamik des Systems beeinflusst. Die Dekohärenztheorie konnte zeigen, dass das Auftreten von quasi-klassischen Messresultaten durch die Existenz einer gegen die Dekohärenz robuste Basis bedingt ist. Dies ist offenbar ein Effekt von abwärtsgerichteter Kausalität von der Umgebung auf das System, indem die Umgebung die robuste Basis gegenüber anderen Basen auszeichnet und damit einen Kontext setzt, in welchem die Dynamik der mikroskopischen Ebene und insbesondere der Transfer auf die makroskopische Ebene beeinflusst wird. Dekohärenz ist zweifellos das zutreffendste Beispiel für abwärtsgerichtete Kausalität, da das Konzept explizit zur Erklärung benutzt wird.

### Auftretende Arten von abwärtsgerichteter Kausalität

In Abschnitt 5.2.5 wurden fünf Arten von abwärtsgerichteter Kausalität differenziert. Aus diesen fünf möglichen Arten erweisen sich drei als zur Beschreibung hilfreich, wohingegen die anderen beiden nicht angewandt werden können. Die beiden zu verwerfenden Konzepte beinhalten beide das Element der Regelung, welches nicht im quantenmechanischen Messprozess enthalten ist. Zwar ist eine einmalig anpassende Reaktion zwischen verschiedenen Ebenen denkbar, allerdings meint Regelung vornehmlich die mehrmalige Anpassung einer Regelgröße bis zum Erreichen eines gewünschten Wertes, was nicht der Kern des Messprozesses ist. Es können also abwärtsgerichtete Kausalität via Regelung durch adaptive und nicht-adaptive Information als unpassend verworfen werden.

Die anderen drei Arten enthalten alle zutreffende Züge. Algorithmische abwärtsgerichtete Kausalität findet sich in der Generierung eines Ergebnisses auf der mikroskopischen Ebene, da die Dynamik auf der mikroskopischen Ebene mit der Schrödinger-Gleichung beschrieben werden kann, welche einem Algorithmus gleichkommt. Zu beachten ist jedoch, dass der Transfer auf die makroskopische Ebene aufgrund des Messproblems nicht algorithmisch durchgeführt werden kann, weshalb keine reine Form, sondern nur ein Teil von algorithmischer abwärtsgerichteter Kausalität vorliegt. Eine höhere Übereinstimmung wird mit abwärtsgerichteter Kausalität via adaptiver Selektion erreicht. Das Messgerät setzt voraus, dass nur Eigenzustände als Messresultate beobachtet werden, womit es Nischen für jene Eigenzustände bereithält und eine Selektion durchführt. Da das Messgerät elementarer Bestandteil des Messprozesses ist und unweigerlich die Selektion durchführt, ist das zugrunde liegende Selektionskriterium adaptiv. Das Gesamtsystem aus Messgerät und Messobjekt bestimmt also selbst, dass nur Eigenzustände und keine Superpositionen beobachtet werden können. Die Kontextabhängigkeit durch das Messgerät bedingt also abwärtsgerichtete Kausalität auf das System via adaptiver Selektion von Eigenzuständen. Zuletzt erweist sich auch intelligente abwärtsgerichtete Kausalität als zutreffend, da die Quantenmechanik und die klassische Mechanik als physikalische Theorien Abstraktionen sind. Wie bereits in Abschnitt 5.3.1 beschrieben, kann die Formulierung solcher Theorien durch ein intelligentes Wesen effektive kausale Wirkungen erzielen, indem beispielsweise technische Gegenstände nach den Vorhersagen der Theorie entworfen oder Aktionen durch die Kenntnis der Theorie in einer bestimmten Art und Weise durchgeführt werden. Dies betrifft auch den quantenmechanischen Messprozess. Dort liegen zwei konkurrierende Abstraktionen zu Grunde, die klassische und die quantenmechanische Beschreibung, welche beide abwärtsgerichtet kausal wirken können, in dem ein Experiment in ihrem Vokabular aufgebaut und verstanden werden muss.

### Resümee

Es konnte gezeigt werden, dass die Terminologie von Campbell und Ellis dazu geeignet ist, den quantenmechanischen Messprozess und das darin auftretende Messproblem zu beschreiben und aufzuzeigen, dass das Messproblem ein Effekt von abwärtsgerichteter Kausalität ist. Selbstverständlich stellt dies keine Lösung dar, sondern vielmehr eine neue Betrachtungsweise eines altbekannten Problems, welches in diesem Gewand etwas weniger als ein Problem und mehr als eine Notwendigkeit erscheint.

Die erfolgreiche Anwendung muss jedoch aus einer anderen Sicht kritisch betrachtet werden, weswegen sich an dieses Kapitel ein weiteres Kapitel anschließen wird. Zwar ist die Beschreibung hinreichend, jedoch ist der aktuelle philosophische Standpunkt der Kausalität im Allgemeinen nicht genügend berücksichtigt worden. Schon bei den undynamischen Ursachen bei George Ellis, die stark an die Ursachen bei Aristoteles erinnern, auf welche sich Ellis auch explizit bezieht, wird deutlich, dass die physikalische Diskussion die Philosophie nicht genügend miteinbezieht. Die verwendeten Begriffe wurden nicht immer explizit definiert und gelegentlich synonym benutzt, weswegen eine klarere Unterscheidung angestrebt werden könnte. Weiterhin wurden die Gedanken oftmals aus Beispielen abgeleitet, was zwar dienlich für die Anschauung ist, jedoch schnell zu Plausibilisierungen anstatt theoretischen Überlegungen führen kann. Zwar mögen die Ergebnisse konsistent sein, jedoch müssen die Fragen gestellt werden, ob die implizit gemachten Annahmen zutreffend sind und der Begriff *Kausalität* aus philosophischer Sicht passend verwendet wurde.

---

## 6 Vorschlag für eine Theorie der absoluten Beobachtung

---

Im letzten Kapitel möchte ich eine alternative Betrachtungsweise vorschlagen, welche das Konzept von Modalität benutzt. Jenes ist eingebettet in eine Umformulierung des gängigen Verständnisses von Erkenntnis und Wissen in der Physik, welches ausgehend von einer Problemanalyse des bisherigen Ansatzes definitorisch strikt formuliert werden soll.

---

### 6.1 Problemanalyse

---

Obwohl das letzte Kapitel gezeigt hat, dass der quantenmechanische Elemente von abwärtsgerichteter Kausalität enthalten kann, muss gesagt sein, dass der Weg dorthin aus philosophischer Sicht sehr unsauber erfolgte. Um Ungenauigkeiten in der Folgenden Argumentation zu vermeiden erscheint mir der Ausgang von den auftauchenden Problemen sinnvoll, welche ich daher zuerst auflisten möchte.

#### **Nicht wohldefinierter Kausalitätsbegriff**

Die von Ellis verwendete Definition von Kausalität (vgl. Abschnitt 5.2.2) erweist sich als praktisch, jedoch nur, weil sie so konzipiert worden ist, worin gleichzeitig ihre Schwäche liegt. Sie verweist implizit auf sich selbst, da die Änderung einer Quantität X per Definition nur dann kausale Effekte auf eine Quantität Y hat, wenn *verlässliche* und *demonstrierbare* Veränderungen zu beobachten sind, wobei aber die kursiv gestellten Worte nur ihren Sinn behalten, wenn schon von einem kausalen Zusammenhang ausgegangen wurde. Hier offenbart sich das Problem der Humeschen Metaphysik, dass eine *verlässliche* Veränderung prinzipiell nicht mit völliger Sicherheit angenommen werden darf. Auch die neuere Entwicklung um John Leslie Mackie und David Lewis bleibt in Ellis Definition unberücksichtigt. So fehlt in Ellis Definition der Umstand, dass die fehlende Änderung von X auch Y unverändert lässt, was bei Mackie durch die hinreichende aber nicht notwendige INUS-Bedingung und bei Lewis durch die Definition über Kontrafaktuale beachtet wurde. Die Probleme des Kausalitätsbegriffs wurden von Ellis geradezu ignoriert.

Des Weiteren wird nicht klar zwischen einem *determinierenden* und einem *kausalen* Einfluss unterschieden. Die Begriffe werden synonym für Wirkungen von Elementen aus einer auf eine andere Ebene verwendet, wobei zweifellos eines Unterschied zwischen determinierender und kausaler Wirkung besteht.

#### **Implizite Annahmen über Kausalität und Physik**

In Abschnitt 5.3.1 zeigte sich, dass die kausal abwärtsgerichtete Wirkung einer physikalischen Theorie deren raumzeitlich uneingeschränkte Gültigkeit voraussetzt und eine ausreichende Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie existieren muss, um die kausale Effektivität zu wahren. Selbstverständlich ist eine derartige Annahme von Gesetzmäßigkeiten notwendig, um überhaupt Naturwissenschaft zu betreiben, jedoch erscheint es mir trügerisch, dies mit einer statischen und von den Beobachtungen des Menschen unabhängigen physikalischen Welt zu rechtfertigen. Die Gewohnheit, dass physikalische Experimente reproduzierbare Messwerte liefern, führt leicht auf den Gedanken, dass eine Welt existiert und der Mensch die Fähigkeit besitzt, jene in einem gewissen Maße zu erkennen. Im Wesentlichen werden dabei die Ansichten vertreten, dass die mögliche Erkenntnis dieser gegenüber dem Menschen absoluten Welt irgendwann vollständig oder stets unvollständig ist. Ungeachtet dieser Differenz kommt die Annahme einer existierenden und beobachtbaren Welt einer stillschweigenden Übereinkunft zwischen den Naturwissenschaftlern gleich, welche als gegeben und bestens durch zahlreiche Experimente bestätigt angesehen wird.

Genauso verhält es sich mit der Annahme von Kausalität. Von den vorgestellten philosophischen Positionen in Abschnitt 4.1 nahm die Kausalität nur bei Kant eine allgegenwärtige Rolle ein, indem er sie als Kategorie der reinen Vernunft formulierte, welche allesamt *a priori* vorhanden sind und dem Verstand als Befähigung zu einem Urteil dienen. Die Gültigkeit von Kausalität ist bei Kant über jeden Zweifel erhaben und geht jeder Beobachtung voraus. Ich möchte dies als Möglichkeit zur Definition anerkennen, jedoch erachte ich die Grundidee, Kategorien zur Urteilsfähigkeit *a priori* voraussetzen, um auf eine absolute Welt abzielen, welche durch zur Erkenntnis befähigte Menschen beobachtet werden kann, für ungeeignet, da dadurch ebenfalls das durch die Humesche Metaphysik Problematische bewusst umgangen statt angegangen wird.

#### **Anspruch einer theoretischen Beschreibung nicht gerecht geworden**

Meine größten Bedenken bezüglich der angestellten Überlegungen gilt ihrer Art. Selbstverständlich sind die Gedanken nachvollziehbar und plausibel, doch liegt genau darin die Gefahr. Bekanntlicherweise lässt sich alles und jedes plausibilisieren. Der Unterschied zu einer axiomatisch aufgebauten Theorie liegt in der Funktionalität bei Begründungen. Eine Theorie wird ihrer Begründungslast durch ihre Axiome oder Postulate gerecht, da jene per Definitionen nicht weiter begründet werden müssen. Eine Plausibilisierung hingegen erstellt nur Zusammenhänge, welche keinem begründendem Anspruch gerecht werden können, da sie Aussagen ohne Verweis auf ein zu Grunde gelegtes Prinzip verknüpfen. Dies äußert sich vor allem in den Überlegungen in Abschnitt 5.2.5. Dort werden fünf Arten von abwärtsgerichteter Kausalität differenziert, deren Kernbestandteile wie beispielsweise adaptive Selektion sehr wohl theoretisch gefasst sind, jedoch ist die Einarbeitung von abwärtsgerichteter Kausalität nicht von theoretischer Natur, da nicht ersichtlich wird, warum es

---

genau fünf und genau diese Arten gibt. Vielmehr gleichen die Arten aus der Naturwissenschaft bekannten Beispielen und die Einarbeitung von abwärtsgerichteter Kausalität einer Plausibilisierung der Zusammenhänge, was aus philosophischer Sicht noch keinen Mehrwert mit sich bringt.

### Differenzen zwischen Betrachtungen aus Physik und Philosophie

Allgemein hat sich das Bild abgezeichnet, dass die hier aufgeführten philosophischen Überlegungen von Physikern den Ansprüchen der Philosophie nicht genügen. Die Problematik des Kausalitätsbegriffs im Allgemeinen wurde in der Physik nicht herausgearbeitet und gelegentlich sogar bewusst übergangen. Dies zeigte sich bereits in Abschnitt 4.3, als verschiedene Theorien der Physik auf Kausalität untersucht wurden und Kausalität als ein beobachtbarer und regelmäßiger Einfluss zwischen zwei Ereignissen aufgefasst wurde, was jedoch zu den bekannten philosophischen Problemen führt. Ich bin mir darüber bewusst, dass es nicht die Aufgabe der Physik ist, ihre Theorien durch die durchdachte Bedeutung ihrer Begriffe, sondern allein durch ihr Abschneiden im Experiment zu rechtfertigen. Aber ich halte es für grob fahrlässig, die philosophische Diskussion zu übergehen oder in dieser Weise zu führen. Ich stütze dies nicht auf mein emotionales Verhältnis zur Philosophie, sondern viel mehr darauf, dass die Physik einer Frage aus dem Weg geht. Warum erweisen sich physikalische Theorien im Experiment überhaupt als genügend? Woher kommt diese Übereinstimmung, die stets als Anlass für den Triumph der Physik genutzt wird? Ist sie rein zufällig, ist sie aus einem anderen Prinzip ableitbar? Es bleibt völlig offen, warum Experimente eine theoretische Vorhersage reproduzieren. Es passiert offenbar, dessen sind wir uns gewiss. Aber die bloße Feststellung kann nicht als Begründung reichen.

---

## 6.2 Ansätze für eine Theorie der absoluten Beobachtung

Es gilt einen Ausweg aus den genannten Problemen zu finden. Ich möchte daran erinnern, dass die folgenden Überlegungen als Vorschlag oder als Ansatz zu verstehen sind. Es ist mein Anliegen eine Alternative aufzuzeigen, die die offenen Fragen auf eine natürliche Weise beantwortet und die gleichzeitig aus der Forderung entspringt, möglichst wenige Annahmen zu machen. Dennoch ist auch dies keine vollständige Lösung, worüber ich mir sehr wohl bewusst bin.

---

### 6.2.1 Kernidee

Als Physiker scheint es notwendig zu sein, eine Art Realität anzunehmen, die unabhängig von Subjekten existiert. Wie sonst sollte man Gleichungen aufstellen können, welche immer und überall im Universum Gültigkeit besitzen sollen? Wie sonst ließe sich der Erfolg und die Zuverlässigkeit der Physik erklären? Wie sonst könnte verstanden werden, warum unterschiedliche Beobachter dasselbe beobachten? Ich muss zugeben, dass die Annahme einer physikalischen Realität sehr intuitiv ist und die aufgeführten Fragestellungen erst gar nicht aufkommen lässt. Jedoch erscheint sie mir in einer Hinsicht sehr unbefriedigend. Sie lässt die Gefangenheit der Subjekte in ihren Beobachtungen außer Acht. Selbst wenn eine physikalische Realität existiert, müssen Subjekte erst Beobachtungen machen, um Aussagen treffen zu können. Für ein beobachtendes Subjekt macht es bei der Beobachtung erstmal keinen Unterschied, ob eine von ihm unabhängige Realität existiert oder nicht. Bevor sich ein Subjekt fragen kann, ob seine Beobachtungen einer Realität entspringen, hat es schon eine Beobachtung gemacht. Der erste Moment *für ein Subjekt* ist damit immer die Beobachtung, selbst, wenn die Beobachtung die Folge einer Ursache ist. Sicherlich ist es möglich aus der Beobachtung eine Realität zu folgern, aber es muss nicht zwangsläufig eine Realität vorhanden sein. Die intuitive Vorstellung wurde also gerade invertiert. Nicht aus einer physikalischen Realität folgt, dass Subjekte irgendwie Beobachtungen machen können, sondern daraus, dass Subjekte beobachten, folgt irgendwie eine physikalische Realität. Die Annahmen „Es existiert eine physikalische Realität“ und „Beobachter beobachten irgendwas“ sind ihrer Wertigkeit gleichwertig, beide stellen einen singulären Startpunkt für Erkenntnis dar, was die Wahl letzterer Annahme legitimiert und gleichzeitig die Wahl ersterer Annahme nicht revidiert. Ich halte es nicht für falsch, eine physikalische Realität anzunehmen, sondern für unelegant und unpraktisch, da die Realität im Moment der Beobachtung unweigerlich auf das Subjekt zurückfällt. Es erscheint mir als Subjekt sicherer, wenn ich sage „Ich habe etwas gesehen“ als wenn ich behaupte „Es gibt etwas“, denn um Letzteres zu behaupten, muss ich mindestens auch ersteres behauptet haben.

Noch ist vollkommen offen, was „Ich habe etwas gesehen“ bedeutet, ob daraus eine Realität folgt und wie sich Subjekte zu ihr verhalten. Klar ist nur, dass bei jeder willkürlichen Wahl für den Ausgang von Erkenntnis und einem Zusammenhang zu Subjekten irgendwann in der Argumentationskette das Subjekt selbst als Instanz auftreten muss, weswegen die Wahl des Subjekts als Startpunkt vor allem deswegen eleganter ist, weil sie im Minimalfall mit nur einer Instanz, nämlich dem Subjekt selbst, auskommt, wohingegen bei jeder anderen Wahl neben dem Subjekt noch der gewählte Startpunkt als Instanz nötig ist.

Was diese Annahme für eine Beobachtung und für eine physikalische Realität bedeutet, wird anhand dieses Vorschlags für eine Theorie diskutiert. Ausgegangen wird von einer *Beobachtung*, welche von einem *Beobachter* getätigt wird. Die Beobachtung nimmt dabei für jeden Beobachter eine absolute Stellung ein, wobei die Absolutheit der Beobachtungen unterschiedlicher Beobachter aufgrund der Gleichberechtigung der Beobachter nicht zu Widersprüchen führt. Anhand

---

dessen unterteilt ein Beobachter in *Messgeräte* und *Messobjekte*, deren Beziehungen durch eine *Wechselwirkung* charakterisiert sind. Der Prozess der Beobachtung lässt sich in drei Instanzen (Beobachter, Messgerät, Messobjekt) und die Relation Beobachtung unterteilen. Auf Seiten des Beobachters schließt sich der Beobachtung der Prozess des Verstehens an. Zentrale Bedeutung hat dabei die *Abstraktion*, welche es dem Beobachter ermöglicht, den beobachteten Messobjekten (und auch Messgeräten) *Eigenschaften* mit zugehörigen *Ausprägungen* zuzuweisen. Eine Zusammenfassung von mehreren Eigenschaften mitsamt Ausprägungen ermöglicht den Übergang zu *Zuständen*. Nach Einführung der Begriffe *Gleichheit* und *Ungleichheit* auf der Ebene der Abstraktionen wird dann der Schritt zum *Möglichen* und *Unmöglichem* gemacht, mit dessen Hilfe *Existenz* und *Nicht-Existenz* definiert werden können und eine naturwissenschaftliche Vorstellung eingebunden werden kann. Daraus folgt eine neue physikalische *Realität*, welche es zu untersuchen gilt.

---

## 6.2.2 Definitionen grundlegender Begriffe und ein Postulat

---

Nachdem die Kernidee vorgestellt wurde möchte ich sämtliche nötigen Begriffe definieren und einführen. Das theoretische Konzept benötigt ein Postulat, welches an geeigneter Stelle eingearbeitet wird.

### Die Beobachtung

Eine Beobachtung ist Moment der Willkür für einen Beobachter. Sie präsentiert sich unergründlich als Ausgang jedweder Form von Erkenntnis, wie ein wiederkehrender Urknall im Kleinen. Ein Beobachter beobachtet, er kann nicht sagen, warum er beobachtet, er kann nicht sagen, woher die Beobachtung stammt, er kann nur sagen, dass er etwas beobachtet. Die Beobachtung besticht durch ihre Notwendigkeit, denn es muss keine Notwendigkeit postuliert werden, da jede Beobachtung eine echte Voraussetzung für alles Weitere darstellt. Die Notwendigkeit der Beobachtung zu verneinen führt zwangsläufig zu einem Widerspruch, da ihre Negation selbst eine Beobachtung ist. Diese bindende Wirkung der Beobachtung für einen Beobachter zwingt ihn, sich in ein Verhältnis zum Beobachteten zu setzen. Er kann sich dem nicht entziehen, oder um es anders zu sagen, ein Beobachter kann nicht *nicht* beobachten. Nichts anderes erweist sich als so unausweichlich und zwangsläufig wie die Beobachtung.

Weiterhin stellt die Beobachtung den Anfang eines jeden Beobachtungsprozesses dar, welchen sie definitorisch beeinflusst. Sie setzt den Rahmen, in welchem der Beobachter später Abstraktionen vornehmen und Messobjekte untersuchen kann. Es existiert nichts, was der Beobachtungen vorausgehen kann, weshalb ich den Begriff Beobachtung wie folgt definieren möchte.

**Definition 1:** Die *Beobachtung* ist der Ursprung von *Allem*.

Die Definition rückt die Beobachtung ins Zentrum sämtlicher erkenntnistheoretischer Positionen und bleibt dabei maximal allgemein, da keine konkreten Erzeugnisse der Beobachtung genannt wurden. Dies wurde bewusst vermieden, da jede Konkretisierung nur im Zusammenhang mit einem erkennenden Subjekt erfolgen kann, beispielsweise würde die Ersetzung des Wortes *Allem* durch das Wort *Information* die Definition von Information voraussetzen, wohingegen die genauen Definitionen von Begriffen im Wort *Allem* verblassen. Es bleibt damit völlig offen, was ein Subjekt aus einer Beobachtung schöpft, es ist nur gewiss, dass sämtliche Überlegungen, Ableitungen oder sonstiges der Beobachtung entstammen.

Zuletzt möchte ich daran erinnern, dass, wenn die Beobachtung der Ursprung von allem ist, die Frage danach, was der Ursprung der Beobachtung ist, keinen Sinn ergibt. Diese Frage wäre äquivalent zu Frage, was dem Urknall vorausging. Die Beobachtung ist also nicht nur die Ermöglichung von Erkenntnis sondern gleichzeitig auch ihre Grenze. Nichts geht über die Beobachtung hinaus.

### Der Beobachter

Intuitiv ist ersichtlich, dass zu jeder Beobachtung eine Instanz gehört, die jene erfahren kann. Diese Rolle wird vom Beobachter eingenommen. Wie bereits erwähnt ist die Beobachtung für den Beobachter bindend und geht ihm voraus, womit sich die Existenz des Beobachters nicht parallel definieren lässt. Ich möchte darauf hinweisen, dass es nicht möglich ist zu behaupten, es wäre ebenso gut denkbar, dass der Beobachter der Beobachtung vorausgeht. Dies ist durch die Definition der Beobachtung nicht möglich. Darüber hinaus muss ein Beobachter, um seine Existenz zu postulieren beobachten, dass er existiert, womit seine Existenz wieder auf eine Beobachtung zurückfällt. Der Beobachter ist damit selbst für sich nicht ohne Beobachtung denkbar. Trotzdem ist auch die Beobachtung an den Beobachter gebunden, allerdings in der Weise, dass sie immer relativ zu einem Beobachter definiert ist. Es ist somit auch sinnvoller von der *Beobachtung eines Beobachters* und nicht einfach *einer Beobachtung* zu sprechen.

Ist man bereit dies zu akzeptieren, stellt sich als nächstes die Frage, was als Beobachter bezeichnet werden darf. Um die Definition für den Beobachter anschaulich zu begründen, möchte ich dies per Ausschlussverfahren beantworten. Zu Beginn wird von allen Dingen, also allen Entitäten aller Wirklichkeitsebenen ausgegangen. Diese können unterteilt werden in lebende und leblose Dinge. Sämtliche leblosen Dinge können nicht beobachten. Dies ist motiviert durch die Bedeutung des Wortes *Beobachtung* im Sprachgebrauch, welche impliziert, dass beobachtende Dinge einen Mehrwert aus

---

der Beobachtung extrahieren können. Dies unterscheidet sie von leblosen Dingen, da jene keinen Mehrwert durch eine Wechselwirkung erhalten. Beispielsweise kann sich ein Proton keine Gedanken darüber machen, warum es von einem Elektron elektrostatisch angezogen wird, es wechselwirkt einfach nur mit dem Elektron. Folglich muss ein Beobachter ein Lebewesen sein, da nur dem Lebewesen die Wahl zusteht, sich in ein Verhältnis zum Beobachteten zu setzen, denn nur Beobachter kann beobachten, dass er beobachtet. Ich möchte bewusst nicht weiter klären, aus welcher Domäne ein Lebewesen stammen muss, um ein Beobachter sein zu können, sondern diese Frage der Biologie und Neurowissenschaft überlassen, worauf ich noch einmal zurückkommen werde, nachdem ich die Definition gegeben habe.

Nun greife ich nochmal darauf zurück, dass jede Beobachtung auf den Beobachter zurückfällt. Sei dazu eine Situation gegeben, in welcher zwei Menschen ein Bild betrachten. Man könnte meinen, jeder der beiden Menschen sei ein Beobachter, da jeder für sich das Bild beobachtet. Nun ist aber offensichtlich so, dass ich Ihnen die Situation und damit meine Gedanken, also meine Beobachtungen, schildere und Sie, während Sie diesen Satz lesen, selbst beobachten, was meine Gedanken sind. Egal wie viele scheinbare Beobachter also an einem Beobachtungsprozess beteiligt sind, am Ende des Beobachtungsprozesses stehen immer Sie selbst, denn die Weitergabe von Beobachtungen ist selbst eine Beobachtung, welche mit Ihnen als Beobachter ihr Ziel findet. Diese Überlegung weist den Weg zur Definition der Beobachtung und dem ersten Postulat. Der Beobachter kann nur mit jedem selbst identifiziert werden, niemand sonst außer man selbst ist tatsächlich der Beobachter. Die Definition lautet daher wie folgt.

**Definition 2:** *Der Beobachter ist das Ich.*

Mit dieser Definition wird auch deutlich, warum ich den Kreis an Lebewesen, welche als Beobachter in Frage kommen, nicht weiter einschränken wollte. Es ist noch nicht zu Genüge geklärt, welche Lebewesen ein Bewusstsein und damit das Verständnis eines Ichs aufweisen können, ich möchte nur versichern, dass jedes Lebewesen, das dazu im Stande ist, als Beobachter anerkannt werden muss.

Wenn das *Ich* als Beobachter identifiziert wird, kommt schnell die Frage auf, welche Rolle andere Menschen spielen und ob deren Beobachtungen überhaupt Beobachtungen im eigentlichen Sinn entsprechen. Um dies beantworten, muss bedacht werden, dass ein Beobachtungsprozess, in welchem zwei *Ichs*, also zwei scheinbare Beobachter involviert sind, in jedem *Ich* für sich endet. Stellen Sie sich dazu vor, dass Sie und ich ein Bild beobachten. Jeder von uns tätigt eine Beobachtung, unabhängig davon, dass der andere auch eine Beobachtung gemacht hat. Die verschiedenen Beobachtungen erfolgen also parallel oder um es anders auszudrücken, Beobachter beobachten nebeneinander, nicht füreinander. Demzufolge sind beide Beobachtungen beider Beobachter gleichwertig und damit auch die Beobachter gleichwertig, da keine Beobachtung gegenüber der andern ausgezeichnet werden kann. Diese Überlegung hat weitreichende Konsequenzen, welche zweifellos über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen. Dennoch sei angemerkt, dass dies zu einer vollkommen subjektivistischen Wahrheit führt, welche zwar objektive Elemente durch Kommunikation von Subjekten enthalten darf, aber letztlich immer auf das Subjekt zurückfällt, ganz im Sinne von Hegel. Außerdem kann damit die Letztbegründung in die Existenz paralleler Wahrheiten verschoben werden, womit beispielsweise der meines Erachtens nach völlig unnötige Kampf zwischen Wissenschaft und Glauben, welche beide letztlich nach Wahrheit suchen, niedergelegt werden kann, da diese Wahrheiten an Subjekte geknüpft sind, welche parallel existieren können. Interagieren zwei gleichberechtigte Beobachter, verschwindet jeder der beiden in der Beobachtung des Anderen. Wie dies weiter gefasst werden kann wird nach der Einführung der Begriffe *Messgerät* und *Messobjekt* thematisiert. Die beschriebene Absolutheit aller Beobachtungen aller Beobachter möchte ich nun als Postulat formulieren.

**Postulat:** *Jede Beobachtung jedes Beobachters ist absolut.*

Es ist mir ganz besonders wichtig, dass dieses Postulat nicht als Anlass benutzt wird, mir Solipsismus oder etwas Derartiges zu unterstellen. Die bisherigen Definitionen und das Postulat lassen die Möglichkeit einer real existierenden Welt offen. Bisher wurden die Beobachtungen paralleler Beobachter in kein Verhältnis gesetzt und die Frage offen gelassen, ob das von parallelen Beobachtern Beobachtete für die Beobachter identisch in Erscheinung tritt oder nicht. Es liegt nur in meinem Interesse, dass uns die Überlegungen von selbst auf die vertraute Welt führen werden.

Zuletzt noch zwei Bemerkungen zur Beobachtung. Erstens werden in vielen Abbildungen zum quantenmechanischen Messprozess das System, das Messgerät und der Beobachter beispielsweise als Kreise und deren Interaktionen mit verbindenden Linien dargestellt. Sollten Illustrationen eines Messprozesses innerhalb dieser Überlegungen erfolgen, so darf der Beobachter nicht mit abgebildet werden, da der Beobachter letztlich immer nur man selbst ist und sich damit vor der Abbildung wiederfindet. Zweitens hat die Beobachtung, wenn sie in einem Beobachter manifestiert wurde, ein weiteres Charakteristikum. Obwohl sie selbst sich der Anschauung entzieht, wirft jede Beobachtung für den Beobachter eine Frage auf. Sie bietet einen Anreiz auf Charakterisierung und Erkenntnis, welcher sich im Beobachter artikuliert. Dies zu analysieren ist Gegenstand des nächsten Abschnitts.

### **Die Abstraktion**

Das Konzept, dass Beobachter parallel absolute Beobachtungen tätigen, ist bis hierhin aufgegangen, jedoch stellt sich



---

nun die Frage, wie es auf Seiten des Beobachters nach einer gemachten Beobachtung weitergeht? Wenden Sie Ihren Blick kurz von diesem Manuskript ab und betrachten Sie die Gegenstände vor Ihnen. Ich tue es Ihnen gleich und finde beispielsweise meinen *Stift* vor. Wie habe ich mich zu meiner Beobachtung in ein Verhältnis gesetzt? Dass es sich um einen Stift handelt, weiß ich, weil ich eines Tages gelernt habe, dass alle Elemente einer gewissen Menge von Gegenständen, welche von Ähnlichkeit geprägt sind, als *Stifte* bezeichnet werden. Für mich existiert also ein Raumzeitpunkt, an welchem der Begriff *Stift* explizit geschaffen wurde. So verhält es sich ebenfalls mit den Gegenständen, welche Sie vorgefunden haben.

Dieses Beispiel soll einen der Grundgedanken der Philosophie veranschaulichen, welcher wohlgemerkt nicht ganz unumstritten ist. Das menschliche Denken erfolgt in Begriffen. Wenn ich meinen Stift vor mir sehe, erscheint mir gedanklich urplötzlich der Begriff *Stift* und ich ordne den Begriff eindeutig meiner Beobachtung zu. Ich habe zu diesem Zeitpunkt keine weiteren Charakterisierungen vorgenommen, beispielsweise kann ich noch nicht sagen, dass mein Stift blau ist, ich habe lediglich einer Beobachtung einen Begriff zugeordnet. Den letzten Gedanken möchte ich betonen, da hier schnell der Eindruck entstehen kann, ich würde voraussetzen, was ein Stift ist, um ihn als solchen identifizieren zu können, womit er aber mir bekannte Eigenschaften aufweisen müsste, welche über die bloße Zuordnung zu einem Begriff hinausgehen. Dem kann ich entgegen, dass die alltäglichen Gegenstände bereits beobachtet wurden und den im Folgenden beschriebenen Charakterisierungsprozess bereits durchliefen. Ihnen wurden also schon Begriffe zugeordnet. Die Bildung eines Begriffs erfolgt daher nur bei der erstmaligen Beobachtung, jede weitere Beobachtungen stellt dann Arbeit am Begriff dar.

Der Findungsprozess von Begriffen und Anschauungsformen des menschlichen Denkens möchte ich als *Abstraktion* bezeichnen. Sämtliche Beobachtungen artikulieren sich in einem Beobachter durch seine Abstraktionen. Dies betrifft also nicht nur Gegenstände wie beispielsweise meinen Stift, sondern auch Relationen zwischen Gegenständen oder völlig abstrakte Konzepte wie Liebe, schlichtweg alles. Die Definition der Abstraktion ergibt sich nun unter Wahrung der Allgemeinheit völlig intuitiv.

**Definition 3:** Die *Abstraktion* ist die Abbildung einer Beobachtung auf einen Beobachter.

Der Begriff Abstraktion darf nicht als eine Transformation vom Konkreten ins Abstrakte aufgefasst werden, da bisher weder das Konkrete, noch das Abstrakte definiert wurden. Die Abstraktion entspricht lediglich der Anwendung der Beobachtung auf das menschliche Denken und ermöglicht die Begriffsbildung. Sie ist damit die Grundlage des menschlichen Denkens und Verstehens und keine Form von Erkenntnis kann außerhalb von abstrahierten Begriffen formuliert werden. Entsprechend kann auch jede theoretische Überlegung auf eine Abstraktion zurückgeführt werden.

Ich möchte zusammenfassend festhalten, dass *jedes* Erfahren von Beobachtung auf der Ebene der Abstraktionen eines Beobachters stattfindet. Bis hierhin musste an keiner Stelle Existenzannahmen von Gegenstände oder der gleichen gemacht werden und da die Beobachtung in Abstraktionen eines Beobachters mündet, ist jetzt schon ersichtlich, dass sich alle Folgerungen des Beobachters, beispielsweise der Existenz meines blauen Stifts, auf dieser Ebene bewegen. Bitte verwechseln Sie dies nicht mit den mehr als fragwürdigen Ansätzen, dass die Welt nur ein gedankliches Konstrukt oder der gleichen sei. Jene Ansätze müssen besonders im hiesigen Kontext abgelehnt werden, da sie implizit die Existenz des Beobachters voraussetzen, welche durch die Absolutheit der Beobachtung nicht angenommen werden darf. Die Existenz von Dingen, welche später eingeführt wird, ist mit der alltäglichen Vorstellung verträglich, nur wird sie nicht einfach angenommen, sondern wird aus den vorigen Überlegungen folgen.

### Das Messgerät und das Messobjekt

Es gilt nun das Beobachtete und Abstrahierte weiter zu charakterisieren. Ich möchte dies auf ein naturwissenschaftliches Denken zuschneiden, um den Fragestellungen in dieser Arbeit näher zu kommen. Ich vermute jedoch, dass sich allgemeinere Definitionen in anderen Kontexten positiv bemerkbar machen würden, was ich gerne aufgrund der Performanz im hiesigen Kontext zurückstellen würde.

Ein beliebiger Gegenstand präsentiert sich einem Beobachter nur innerhalb einer Beobachtung. Weiterhin kann ein Beobachter einen Gegenstand nie in einer zeitlosen Gesamtheit innerhalb nur einer Beobachtung erfassen. Viel mehr wählt er eine Art des Zugangs, womit er einen bestimmten Teil des Gegenstandes untersucht. Lassen Sie mich dies mit einem weiteren kurzen Gedankenexperiment für Sie verdeutlichen. Stellen Sie sich vor, ich hätte vorhin bei der Entdeckung meines Stifts die Augen verschlossen gehabt. Ich hätte den Stift dennoch durch Ertasten auffinden können. Die Charakterisierung des Stifts wäre nun über einen anderen Zugang erfolgt, nämlich über die räumliche Beschaffenheit seiner Oberfläche. Hätte ich anschließend die Augen geöffnet wäre die Charakterisierung durch seine Form oder ähnliches möglich gewesen. Die Art des Zugangs bestimmt also zwangsläufig die möglichen Aussagen eines Beobachters. Mit geschlossenen Augen ist es mir nicht möglich, die Farbe des Stifts zu bestimmen.

Somit sind sowohl die Form, als auch der Inhalt der Erkenntnis eines Beobachters über einen Gegenstand daran gebunden, *wie* er den Gegenstand beobachtet. Dieses *Wie* möchte ich ganz im Stil der Physik als *Messgerät* bezeichnen. Die Definition des Messgerätes muss die Art des Zugangs enthalten, da sie eine Reduktion des beobachteten Gegenstandes auf eine diskrete Menge an Zuständen enthält. Weiterhin muss das Messgerät an das untersuchte Messobjekt angepasst



---

sein, das heißt, es muss zum Messobjekt assoziiert sein. Beispielsweise ließe sich die Masse eines Gegenstandes nicht mit Hilfe einer Lupe bestimmen. Messgerät und Messobjekt sind untrennbar über die Abstraktion eines Beobachters aneinander geknüpft. Dieser Gedanke führt zu der vierten Definition, welche zugegebener Maßen eine höhere Komplexität als die bisherigen Definitionen aufweist, was uns aber kein Hindernis sein soll.

**Definition 4:** *Das Messgerät ist die zu einem assoziierten Messobjekt manifestierte Abstraktion eines Beobachters.*

Das Manifestieren im Messgerät durch den Beobachter erfolgt dabei in beide Richtungen zwischen Messgerät und Messobjekt. Angenommen ein Beobachter macht eine Beobachtung, die er zuvor nie gemacht hat und die sich auch nicht mit seinem bisherigen Vokabular darstellen lässt, dann abstrahiert er nicht nur ein neues Messobjekt mit Zuständen, sondern im selben Zuge auch das zugehörige Messgerät. Die Abstraktion manifestiert sich damit rückwirkend im Messgerät. Im umgekehrten Fall würde dies bedeuten, dass ein Beobachter ein Messobjekt und dessen Zuständen abstrahiert, bevor er das entsprechende Messobjekt durch ein assoziiertes Messgerät beobachtet hat. Dies ist selbstverständlich auf der Basis gemachter anderer Beobachtungen und deren Abstraktionen als neue Abstraktionen (welche bekanntlicherweise Beobachtungen entspringen, nur in diesem Fall eben nicht direkten Beobachtungen des abstrahierten Gegenstandes) möglich. Anschließend assoziiert und baut er ein Messgerät, mit welchem er das Messobjekt untersucht. Der Beobachter erhält in beiden Fällen nicht nur Informationen über das Messobjekt, sondern immer auch über das assoziierte Messgerät, das heißt, dass das Messgerät den Zustand eines Messobjektes und sich selbst auf einen Beobachter abbildet. Dies führt unweigerlich dazu, dass ein Messgerät ein notwendiger Bestandteil einer Beobachtung ist, dass also eine Beobachtung ohne Messgerät, oder anders gesagt die direkte Beobachtung des Messobjektes, nicht möglich ist.

Weiterhin folgt daraus, dass ein Messobjekt ohne ein Messgerät nicht definiert ist, da es sich sowohl der Abstraktion, als auch der Festlegung seines Zustandes entzieht. Weiterhin ist zu sagen, dass ein Messgerät nicht außerhalb eines Beobachters manifestiert sein muss. So sind die Sinne des Menschen ebenfalls als Messgeräte aufzufassen (womit auch der letzte Zweifel, dass ein Messobjekt nicht direkt beobachtet werden kann, beseitigt ist, da der Mensch ausschließlich über seine Sinneserfahrungen Beobachtungen machen kann).

Analog zu den bisherigen Überlegungen gilt auch hier entsprechend der Definition, dass ein Messgerät immer relativ zu einem Beobachter zu verstehen ist, da es der Beobachter ist, welcher die Abstraktion im Messgerät manifestiert. So kann erst einmal nicht davon ausgegangen werden, dass ein Beobachter und ein ihm paralleler Beobachter bei einem augenscheinlich gleichen Messgerät auch das Gleiche vermessen, da jeder von ihnen seine eigene Abstraktion zu Grunde gelegt hat, weshalb das setzende Moment vom Beobachter und nicht vom Messgerät ausgeht. Um es noch abstruser wirken zu lassen lässt sich hier sogar behaupten, dass nicht einmal die Einigkeit über das *Messen selbst* bestehen muss. Es wäre also möglich, dass Beobachter das Messen anders *messen*. Ich möchte Sie jedoch gleich beruhigen und versprechen, dass wir diesen Vorstellungen aus dem Weg gehen werden. Um die Frage zu beantworten, in wie weit die beiden Beobachter trotzdem Übereinstimmungen feststellen können, muss erst geklärt werden, was übereinstimmen im Allgemeinen bedeutet, also letztlich, was Gleichheit und Ungleichheit ist.

Ergänzend ist zu erwähnen, dass der Begriff Messgerät offen lässt, wie Messgeräte, die beliebig zusammenspielen, voneinander abgegrenzt werden können. Wird ein physikalisches Messgerät zur Untersuchung eines Messobjektes eingesetzt, so spielen für einen Beobachter mindestens seine Sinne und das physikalische Messgerät zusammen. Beide können im Einzelnen Messgeräte sein, sie können aber für eine Messung auch als ein einziges Messgerät aufgefasst werden. Die Separation in Messgeräte verschiebt sich demnach in den Aufgabenbereich der Theorienbildung, welche gegen Ende dieser Überlegungen in Angriff genommen wird.

Komplettiert werden der Beobachter und das Messgerät durch das bereits erwähnte Messobjekt. Auch das Messobjekt ist unweigerlich an den Beobachter und seine Abstraktionen geknüpft, wobei sich das Messobjekt als die zum Messgerät gehörige konkretisierte Form der Abstraktion erweist. Das bedeutet nicht, dass ein Beobachter ein Messobjekt durch ein Messgerät als *konkret* wahrnimmt, sondern nur als *konkretisiert*, da letztlich immer auf eine Abstraktion des Beobachters verwiesen wird. Demzufolge können Messobjekte (wie auch Messgeräte) nie konkret beobachtet werden, eine Beobachtung eines Beobachters erbringt in ihren Abstraktionen lediglich konkretisierte Formen, welche in der gängigen Praxis den trügerischen Augenschein eines absolut existierenden Objektes erwecken. Sei also die Definition des Messobjektes wie folgt gegeben.

**Definition 5:** *Das Messobjekt ist die konkretisierte Form einer abstrahierten Beobachtung eines Beobachters.*

Die konkretisierte Form ist dabei das, was übrig bleibt, wenn ein Beobachter seine Abstraktionen bis auf ein Minimum entfernt, womit er mit jedem iterativen Schritt der Entfernung einer Abstraktion an Zugänglichkeit verliert. Dabei ist die vollkommen konkrete Form unzugänglich, weshalb es nicht möglich ist, die Abstraktionen restlos zu entfernen. Anschaulich entspräche die konkrete Form der bloßen Wahrnehmung ohne zugehörige Vorstellung, weder über das Wahrgenommene, noch über das Wahrnehmen an sich, was aufgrund des Denkens in abstrahierten Begriffen nicht gefasst werden kann. Das Messobjekt im Gesamten ist damit als Konklusion der Beobachtung zu sehen. Die Frage, was alles als Messobjekt in Erscheinung treten kann, ist mit dem Beliebigen beantwortbar. Alles, was beobachtet wird, kann

---

Messobjekt sein. Dies schließt den Beobachter und das Messgerät mit ein, wodurch ein Beobachter Aussagen über sich selbst, wie zum Beispiel die Folgerung seiner eigenen Existenz, machen kann.

Weiterhin folgt aus den Definitionen eine gewisse Symmetrie zwischen Messgerät und Messobjekt. Da Messgeräte und Messobjekte zueinander assoziiert sind, lässt sich jedes Messgerät auch als Messobjekt auffassen, welche sogar zur vollständigen Symmetrie zwischen Gegenständen führen kann. Für Letzteres kann beispielsweise ein Elektron einem Beobachter als ein qualitatives Messgerät dienen, um die Ladung eines Protons über die Bewegung des Elektrons zu bestimmen (damit wäre das Elektron das Messgerät und das Proton das Messobjekt), ebenso gut könnte aber auch die Ladung des Elektrons über die Bewegung des Protons bestimmt werden (wobei das Elektron das Messobjekt und das Proton das Messgerät sein würde). Ich fürchte, dass an dieser Stelle einige Verwirrung entstehen kann, wenn die Begriffe Messgerät und Messobjekt mit den gewohnten Bedeutungen belastet werden. Um dies aus dem Weg zu räumen werde ich ein Beispiel diskutieren, an welchem die Abstraktheit der Definitionen klar werden soll. Sei eine gewöhnliche Küchenwaage und ein Stein gegeben. Jeder würde intuitiv behaupten, dass der Stein ein Messobjekt ist, dessen Gewicht vom dem Messgerät Waage vermessen wird. Wie verhält es sich aber im hiesigen Kontext? Beginnen wir mit der intuitiven Behauptung. Ein Beobachter beobachtete zwei Gegenstände. Er abstrahiert die Begriffe Waage und Stein und schreibt den damit verknüpften Gegenständen korrelierte Eigenschaften zu. Die Assoziation der Waage zum Stein liefert die Eigenschaft Gewicht, womit es der Waage möglich wird, eine Aussage über die Eigenschaft Gewicht eines (wohlgemerkt!) beliebigen Gegenstandes zu treffen, in dem die ursprüngliche Assoziation vom Beobachter auf andere Gegenstände abstrahiert wird. Dies schließt die Waage mit ein, sodass auch die Waage ein Gewicht besitzt. Folglich darf die Waage als Messobjekt, welchem die Eigenschaft Gewicht zugeschrieben wird, betrachtet werden, da sich die Waage als eine konkretisierte Form der Abstraktion Gewicht erweist. Das Beispiel zeigt auch, dass ein Messobjekt nicht zwangsweise als Messgerät aufgefasst werden darf. Der Stein ist nicht dazu in der Lage, eine Aussage über das Gewicht der Waage zu treffen, da in ihm keine Abstraktion des Messens von Gewicht, sondern nur die Abstraktion von Gewicht manifestiert ist.

Zum Abschluss möchte ich noch einmal die enge Verknüpfung von Messgeräten und Messobjekten hervorheben. Beide sind echte Voraussetzung füreinander und können ausschließlich koexistieren. Sie sind zueinander assoziiert und entspringen im gleichen Zug einer Abstraktion. Schon jetzt erinnert dies an das aus der Physik bekannte Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment und stellt einen großen Schritt in Richtung einer Möglichkeit zur naturwissenschaftlichen Theoriebildung dar.

### **Die Wechselwirkung**

Bereits in den vorigen Überlegungen ist deutlich geworden, dass Relationen zwischen Messgeräten und Messobjekten auftauchen können, welche die Verknüpfung der beiden beinhalten. Relationen können prinzipiell zwischen sämtlichen und beliebig vielen Gegenständen bestehen, vollkommen egal, ob sie einem Messgerät oder einem Messobjekt zugeordnet sind. Sie entsprechen ebenfalls einer Abstraktion eines Beobachters, sind also dahingehend variabel. Im Sinne der traditionellen Terminologie der Physik möchte ich diese Relation als *Wechselwirkung* bezeichnen. Eine Wechselwirkung zwischen Gegenständen ist gekennzeichnet durch ihre uniforme Wirkung, sie wirkt stets zwischen allen beteiligten Entitäten. Diese Berechtigung erhält sie durch den Beobachter. Er abstrahiert eine Wechselwirkung, welche die Assoziation zwischen Messgeräten und Messobjekten beschreibt. Da jene Assoziation in allen Messgeräten und Messobjekten dieser Art implementiert ist, kann eine Wechselwirkung auch zwischen Messobjekten und zwischen Messgeräten auftreten. Die aus der Physik bekannte Auffassung einer Wechselwirkung kommt demnach sehr nahe an die meine heran. Bevor ich die Wechselwirkung definiere, möchte ich noch auf einen Punkt hinweisen. Bis jetzt ist klar, dass eine Wechselwirkung eine Relation von Messgeräten und Messobjekten ist. Es bleibt nur noch zu fragen, von welcher Art diese Relation ist, das heißt, ob sie sich dynamisch oder statisch verhält. Ich denke, dies ist intuitiv zu beantworten. Die Abstraktion einer Beobachtung eines Beobachters enthält nicht nur ein Messgerät und ein Messobjekt, sondern auch deren Relation, die Wechselwirkung. Da durch neue Beobachtungen das bestehende Verhältnis von Messgeräten und Messobjekten verändert werden kann, muss die Wechselwirkung diese Änderung vermitteln können und damit dynamische Züge aufweisen. Anders gesagt, wenn die Wechselwirkung statisch wäre, könnten von vorne rein keine Messobjekte und Messgeräte abstrahiert werden, da dann keine Form von Assoziation, wohlgerneht ein beidseitig gerichteter Prozess, möglich wäre. Dass Messgeräte und Messobjekte zueinander assoziiert sind, setzt also deren dynamische Wechselwirkung voraus. Entsprechend lässt sich die Definition formulieren.

**Definition 6:** Die *Wechselwirkung* ist die dynamische Relation von Messgeräten und Messobjekten.

Mit dieser Definition wird eine meiner Ansicht nach wichtige Möglichkeit erhalten. Eine Wechselwirkung kann selbst ein Messobjekt sein. Dies ist Jedem sicherlich bekannt, beispielsweise wird in Teilen der Psychologie die Beziehung von Menschen untersucht, womit eine dynamische Relation von Messobjekten selbst zu einem Messobjekt wird. Ich behaupte, dass gerade darin die Stärke der bis zu diesem Zeitpunkt eingeführten Begriffe liegt. Sie sind allgemein genug gehalten, dass jede Beobachtung in diesen Abstraktionen beschrieben werden kann. Weiterhin weisen sie eine gewisse Symmetrie bei der Anwendung auf, weshalb die Anzahl der benötigten Begriffe gering gehalten werden konnte.

---

## Die Gleichheit und die Ungleichheit

Als Nächstes gilt es dann zu untersuchen, was genau eine Wechselwirkung vermittelt. Damit dies geschehen kann, müssen die wohl wichtigsten Begriffe der Logik und der Mathematik, *Gleichheit* und *Ungleichheit* eingeführt werden, welche auch der Physik zu ihrem Triumph verhalfen. Beide Begriffe erweisen sich als besonders schwierig zu definieren, da ihr elementarer Gebrauch schnell zu einer tautologischen Definition führt. Ich möchte daher die Definitionen dieses Mal ohne eine vorhergehende Motivation vorschlagen und erst danach rechtfertigende Argumente geben.

**Definition 7:** Zwei Abstraktionen sind **gleich**, wenn sie im Rahmen mindestens einer Abstraktion vertauscht werden dürfen.

**Definition 8:** Zwei Abstraktionen sind **ungleich**, wenn sie im Rahmen mindestens einer Abstraktion nicht vertauscht werden dürfen.

Der wichtigste Punkt dieser Definitionen ist, dass sowohl Gleichheit als auch Ungleichheit selbst Abstraktionen eines Beobachters sind, sich also auf der Ebene der Abstraktionen artikulieren. Nebenbei bemerkt muss dies folgen, da sonst eine Unterscheidung in Messgeräte und Messobjekte, zu welcher Ungleichheit benutzt werden muss, auf der Ebene der Abstraktionen gar nicht möglich gewesen wäre.

Gleichheit und Ungleichheit dienen dem Beobachter als Abstraktionen, welche die Abgrenzung und Verbindung von Abstraktionen ermöglicht. Dies unterstreicht die Absolutheit der Beobachtungen auf eine stärkere Weise als zuvor. Ob zwei parallele Beobachter das gleiche beobachten, so wie es immer implizit angenommen wird, oder nicht, ist nicht zu entscheiden, bevor definiert wurde, was Gleichheit und Ungleichheit bedeuten und wo sie sich artikulieren. Da sie Abstraktionen eines jeden parallelen Beobachters sind, kann nur jeder Beobachter *für sich* die fehlende oder vorhandene Übereinstimmung mit anderen parallelen Beobachtern auf seiner Ebene der Abstraktionen erreichen. Die bis dato stille Übereinkunft, dass wir alle in der selben Welt leben und die selbe Welt beobachten, ist demnach keineswegs eine *stille* Übereinkunft, sondern eine *bewusste* Übereinkunft. Ein Ding, welches von zwei parallelen Beobachtern beobachtet wird, ist nicht ein Ding, sondern ein Ding *für jeden* Beobachter, wobei jeder Beobachter den anderen als Messgerät und das Ding als Messobjekt auffasst und dies im gesamten als eine absolute Beobachtung, welche er auf der Ebene der Abstraktionen mit den Aussagen des anderen Beobachters, der als Messgerät fungiert, gleichsetzt. Nun sind wir endlich an dem Punkt angekommen, an welchem die scheinbar unabhängige Absolutheit der Welt aus den Definitionen und dem einen Postulat gefolgt ist. Die gängige Vorstellung einer absolut erscheinenden Welt darf beibehalten werden, wenn berücksichtigt wird, dass nicht die Welt *an sich* absolut ist, sondern deren als gleich definierte Erscheinung in jeder absoluten Beobachtung jedes Beobachters.

So wie parallele Beobachter *für sich* übereinstimmen können, kann auch ein Beobachter *mit sich* übereinstimmen. Angenommen neben meinem blauen Stift, welcher eigentlich ein Bleistift ist, liegt ein Kugelschreiber. Durch die Anwendung der Abstraktionen Gleichheit und Ungleichheit kann ich die Beobachtungen zu *Bleistift* und *Kugelschreiber* abstrahieren. Mit Gleichheit definiere ich eine Menge *Stifte*, in welche ich beide abstrahierten Beobachtungen einfüge. Ich setze also die Abstraktionen *Bleistift* und *Kugelschreiber* unter der Zuordnung zu einer Menge *Stifte* gleich. Gleichzeitig unterscheide ich die Stifte mit Ungleichheit nach ihrer geschriebenen Farbe. Unter der Zuordnung zur Menge *Farbe* sind die Abstraktionen *Bleistift* und *Kugelschreiber* also ungleich. Dies zeigt, dass sich Gleichheit und Ungleichheit nicht nur auf die Abstraktionen an sich, sondern auch auf deren Beschaffenheit beziehen, denn was im Beispiel charakterisiert wurde waren die *Eigenschaften* der Stifte, welche im Anschluss diskutiert werden.

Entsprechend den Definitionen von Gleichheit und Ungleichheit ergibt sich ein weiteres Charakteristikum. Gleichheit und Ungleichheit sind komplementär zueinander. Es ist also immer möglich, zwei Abstraktionen als gleich oder ungleich zu abstrahieren, solange *beide* Abstraktionen gegenüber anderen abstrahierten Beobachtungen benutzt werden. Zwei abstrahierte Beobachtungen sind demnach nie vollständig *gleich* oder *ungleich*. Dies hat weitreichende Konsequenzen für die Theoriebildung, welche ich im nächsten Abschnitt betrachten möchte.

Abschließend möchte ich festhalten, dass Gleichheit und Ungleichheit sowohl die Vergleichbarkeit von Beobachtungen eines Beobachters wie auch die Vergleichbarkeit von Beobachtungen mehrerer Beobachters für sich ermöglicht haben. Dies lieferte den langersehnten Grund für den Eindruck, dass wir alle in der selben Welt leben und ist der entscheidende Trick, mit welchem der Weg für jede Naturwissenschaft nun vollkommen frei ist.

## Die Eigenschaft, die Ausprägung, der Zustand

Die Möglichkeit des Verstehens ergibt sich einem Beobachter durch die Abstraktion seiner Beobachtung, doch der Prozess der Abstraktion selbst, das Abstrahieren, hat noch keinen Informationsgehalt, da das Resultat nicht feststeht, solange abstrahiert wird. Grundlage für das menschliche Verstehen ist aber das Resultat, denn das Denken erfolgt in gebildeten Begriffen. Der Prozess des Abstrahierens erscheint im Allgemeinen sehr unzugänglich, nie ist bekannt, wie genau die Begriffe zu Stande gekommen sind, doch sind sie einmal da, kann jede neue Beobachtung durch eine Abstraktion mit den vorhandenen Begriffen eingeordnet werden oder aber neue Begriffe bilden, wozu Gleichheit und Ungleichheit benutzt werden kann. Es gibt also einen Punkt, an dem der Prozess der Abstraktion eine resultathafte Abgeschlossenheit erreicht, sodass das Resultat zum Einordnen und damit letztlich zum Verstehen genutzt werden kann. Zu Bedenken ist außerdem,

---

dass der Prozess der Abstraktion über diesen Punkt hinaus neue Resultate erbringen kann, da jede Beobachtung mehrfach und verschieden abstrahiert werden kann. Das Resultathafte der Abstraktion möchte ich in der Definition der Eigenschaft implementieren.

**Definition 9:** Die *Eigenschaft* ist das Resultat einer Abstraktion eines Beobachters.

Beachten Sie das bestimmte Pronomen *das*. Die Abstraktion zeigt prozessualen und resultathaften Charakter, wobei Letzteres immer auf eine Eigenschaft führt. Die Eigenschaft bildet den Wertebereich der Abstraktion. Jene kann ein Messgerät, ein Messobjekt, den Beobachter, die Beobachtung, oder eine andere Abstraktion beschreiben, letztlich führt aber jeder Versuch Erkenntnis aus Begriffen zu gewinnen dazu, dass den abstrahierten Begriffen Eigenschaften zugeschrieben werden. So konnte ich vorhin behaupten, mein Stift sei blau, womit ich die Eigenschaft *Farbe* angesprochen habe.

Offensichtlich können einer abstrahierten Beobachtung mehrere Eigenschaften zugeschrieben werden, da der Prozess der Abstraktion mehrere Resultate hervorbringen kann. So weist mein Stift nicht nur die Eigenschaft *Farbe*, sondern auch die Eigenschaft *Gewicht* auf. Die Charakterisierung einer Beobachtung beginnt damit, dass der Beobachter seiner Beobachtung Eigenschaften zuschreibt, das heißt, dass er sich entweder festlegt, dass eine Beobachtung eine neu abstrahierte Eigenschaft aufweist, die er dann definiert, oder, dass die Beobachtung schon abstrahierte Eigenschaften besitzt.

Die Eigenschaft ist ein Werkzeug zur Kategorisierung sämtlicher abstrahierter Beobachtungen, da sich der Beobachter bei jeder Beobachtung fragen kann, ob sie Eigenschaften einer vorhergehenden abstrahierten Beobachtung besitzt oder nicht. Dem kommt ebenfalls zu Gute, dass die Eigenschaft als Resultat der Abstraktion auf der Ebene der Abstraktionen anzutreffen ist, womit die Anwendung von Gleichheit und Ungleichheit möglich ist. Das Ziel von Eigenschaften ist es, ein von Beobachtern und der Raumzeit unabhängiges Kriterium zur Kategorisierung zu liefern. Die Übereinstimmung von Beobachtern bezüglich Eigenschaften entspringt wieder aus dazu definierten Übereinstimmungen paralleler Beobachter, weswegen Sie genauso gut wie ich wissen, was eine *Farbe* ist.

Durch die Einführung des Begriffs Eigenschaft lässt sich die Assoziation von Messobjekten zu Messgeräten präziser beschreiben. Durch die Assoziation hat keines der beiden separierbare Eigenschaften, es sind ausschließlich simultane Eigenschaften möglich. Erinnern Sie sich an das Beispiel mit Waage und Stein. Der Stein hat keine Eigenschaft *Gewicht*, wenn keine Waage diese Eigenschaft vermessen kann. Allgemein *hat* ein Messobjekt Eigenschaften, während ein Messgerät Eigenschaften *setzt*. Dadurch dass das Messgerät selbst als Messobjekt aufgefasst werden kann folgt sofort, dass auch das Messgerät Eigenschaften *hat*. Die Assoziation erfolgt also über Eigenschaften.

Beachten Sie, dass Eigenschaften die Dynamik der Wechselwirkung und der Abstraktion zu Spüren bekommen können. Durch neue Beobachtungen, welche unabhängig von einem abstrahierten Gegenstand erfolgen können, also Abstraktionen aus reinen Gedankenprozessen sind, oder tatsächliche Beobachtungen eines Gegenstandes sind, in welchem sich die Dynamik der Wechselwirkung artikuliert, kann die explizite Definition einer Eigenschaft verändert werden.

Lassen Sie mich nochmal auf meinen blauen Stift zurückkommen. Wir hatten bereits festgehalten, dass der Stift die Eigenschaft *Farbe* aufweist. Versuchen Sie einmal sich die Eigenschaft *Farbe* explizit vorzustellen. Ich will behaupten, dass Ihnen dies nicht gelingen wird. Sie denken vermutlich an konkrete Farben wie *blau*, *rot* oder *grün*, aber was *Farbe* selbst ist, können Sie nicht sagen. Eine Eigenschaft ist nicht mehr als eine Kategorie, welche Formen der Anschauung für Gegenstände bereitstellt. Erst die Zuordnung von *Ausprägungen* zu Eigenschaften beschreibt die Charakteristiken eines Gegenstandes. Ausprägungen zielen auf die Vergleichbarkeit von Gegenständen ab, welche die gleiche Eigenschaft aufweisen. So kann ich sagen, dass mein Bleistift *blau* und mein Kugelschreiber *schwarz* ist. Beide weisen die Eigenschaft *Farbe* auf, unterscheiden sich jedoch in deren Ausprägung. Es folgt die Definition der Ausprägung.

**Definition 10:** Die *Ausprägung* einer Eigenschaft ist ein von einem Beobachter eindeutig gesetztes Vergleichskriterium.

Dazu eine Bemerkung, welche die problemlose Anwendung von Eigenschaften und Ausprägungen sichern soll. Ist eine Eigenschaft abstrahiert, ist sie beliebig auf jede weitere abstrahierte Beobachtung anwendbar. Erweist sich eine Abstraktion als nicht durch eine bestimmte, schon gebildete Eigenschaften beschreibbar, wird ihr die Eigenschaft zugeordnet, dass sie die gebildete Eigenschaft nicht besitzt, was mit der Ausprägung 'nicht besitzen' dieser Eigenschaft gleichgesetzt wird.

Ausprägungen können in qualitative und quantitative Ausprägungen differenziert werden. Letzteres ist unser nächster Schritt auf dem Weg zu einer Naturwissenschaft. Für quantitative Ausprägungen gelten Ordnungsrelationen entsprechend der Zahlenmenge, aus welcher sie stammen, und das Aufstellen von mathematischen Gleichungen wird möglich. Die Gefahr bei der Zuordnung von Ausprägungen zu Eigenschaften liegt in einer möglichen Mehrdeutigkeit. Um diese auszuschließen, habe ich in der Definition die Formulierung *eindeutig* gewählt. Ich möchte die auftauchende Problematik dennoch an einem Beispiel diskutieren. Ein Beobachter findet die Nahrungsmittel Salz, Zucker und Pfeffer vor sich. Er probiert alle drei und abstrahiert die Eigenschaft *Geschmack*. Da er den Eindruck hat, dass alle drei verschieden schmecken, definiert er zu jedem Nahrungsmittel eine Ausprägung. *Salzig* für Salz, *süß* für Zucker und *scharf* für Pfeffer. Damit wurden die drei abstrahierten Beobachtungen unter der Eigenschaft *Geschmack* zusammengefasst und durch die definierten Ausprägungen *salzig*, *süß* und *bitter* differenziert. Anschließend abstrahiert der Beobachter eine weitere Eigenschaft



---

*Farbe*. Er definiert dazu die Ausprägungen *weiß* für Zucker und Salz und *schwarz* für Pfeffer. Zum einen wird hier ein weiteres mal deutlich, dass auf der Ebene der Abstraktionen Gleichheit erreicht werden kann (Salz und Zucker haben beide die *Farbe weiß*, womit sie unter diesem Kriterium nicht zu unterscheiden sind) und zum anderen zeigt sich, dass es im ersten Moment vollkommen willkürlich erscheint, dass für die Ausprägungen *weiß* und *schwarz* überhaupt eine neue Eigenschaft *Farbe* abstrahiert werden musste. Es wäre ebenso denkbar gewesen, dass *weiß* und *schwarz* nur andere Ausprägungen der Eigenschaft *Geschmack* gewesen sind. Dies ist durch die eindeutige Zuordnung von Ausprägungen zu Eigenschaften nicht möglich. Sobald eine Eigenschaft abstrahiert und ihr für eine abstrahierte Beobachtung eine Ausprägung zugeordnet wurde, ist es nicht mehr möglich, eine weitere, eventuell andere Ausprägung für die gleiche Eigenschaft der gleichen abstrahierten Beobachtung zu definieren. Für das Beispiel folgt daraus, dass *weiß* und *schwarz* keine Ausprägungen der Eigenschaft *Geschmack* sein können, da den abstrahierten Beobachtungen schon Ausprägungen für die Eigenschaft *Geschmack* zugeordnet wurde.

In den Beispielen hat sich gezeigt, dass Gegenstände mehrere Eigenschaften mitsamt Ausprägungen besitzen können. Um das für jede abstrahierte Beobachtung Charakteristische zusammenzufassen wird der Begriff *Zustand* eingeführt. Zustände spielen in der Physik spätestens seit der Quantenmechanik eine gewichtige Rolle, da sie dort der erste Schritt weg von den konkret erscheinenden Größen wie beispielsweise der Masse oder der Ladung eines Teilchens, hin zu einer abstrakten Auffassung von Systemen sind. Trotzdem beinhaltet der Zustand die Eigenschaften und Ausprägungen der konkreten Vorstellungen, weshalb man hier guten Gewissens behaupten kann, dass die Möglichkeit zur Vorstellung nicht durch der Effizienz eines abstrakten Zugangs verloren geht. Die Definition ergibt sich denke ich völlig intuitiv.

**Definition 11:** Der *Zustand* ist eine Menge von Ausprägungen von Eigenschaften.

Der Zustand charakterisiert eine abstrahierte Beobachtung vollständig. Nehmen Sie diese Aussage bitte nicht zum Anlass zu folgern, dass dies auch für den Begriff Zustand in der Quantenmechanik gilt und wir uns auf der Seite derer wiederfinden, die behaupten der quantenmechanische Zustand eines Systems kann vollständig bestimmt werden. Der Begriff Zustand ist im hiesigen Kontext weitaus abstrakter. Die Zusammenführung beider Begriffe wird Gegenstand des nächsten Abschnitts sein.

### Das Existierende und das Mögliche

Die finalen Überlegungen gelten der Existenz und dem Möglichen und schließen sich an die Überlegungen zur Übereinstimmung eines und mehrerer Beobachter, jeder *jeweils für sich*, an. Wir hatten gefolgert, dass der Eindruck, wir würden aller in derselben Welt leben, auf die Absolutheit der Beobachtungen der parallelen Beobachter und die Möglichkeit von Gleichheit auf der Ebene der Abstraktionen jedes parallelen Beobachters zurückgeführt werden kann. Die letzte offene Frage ist, was denn nun existiert und was nicht.

Die Beobachtung ist der Ursprung von allem. Jede Beobachtung verhilft dem Beobachter und dem Beobachteten zu ihrer Koexistenz, denn durch die Beobachtung kann der Beobachter sowohl seine eigene, als auch die Existenz seiner Beobachtung folgern. Ich möchte darauf hinweisen, dass nicht angenommen werden darf, dass die Beobachtung, weil sie der Ursprung von allem ist, existieren muss. Existenz ist ein Konzept des menschlichen Denkens und fällt wie jede Abstraktion auf den Beobachter zurück. Die Existenz einer vom Beobachter unabhängigen Beobachtung zu postulieren ist demnach unmöglich. Wesentliches Merkmal von Existenz ist also, dass sie nur auf abstrahierte Beobachtungen bezüglich eines Beobachters angewandt werden kann.

Weiterhin ist Existenz nur für die Dauer der Beobachtung eines Beobachters für den Beobachter gewiss. Wird etwas nicht mehr von einem Beobachter beobachtet, kann der Beobachter keine Existenzaussagen tätigen. Er kann lediglich Möglichkeitsaussagen treffen. Diesem Gedanken folgend das Existierende und das Mögliche definiert werden.

**Definition 12:** Das *Existierende* ist der Zustand, den eine abstrahierte Beobachtung eines Beobachters während der Beobachtung des Beobachters besitzt.

**Definition 13:** Das *Mögliche* ist der Zustand, den eine abstrahierte Beobachtung eines Beobachters außerhalb der Beobachtung des Beobachters besitzt.

Das Existierende und das Mögliche erlauben eine vollständige Einordnung von abstrahierten Beobachtung. Während ein Gegenstand von einem Beobachter beobachtet wird, existiert der Gegenstand (und der Beobachter) für den Beobachter. Beobachtet der Beobachter einen anderen Gegenstand, befindet sich der erste Gegenstand für den Beobachter im Bereich des Möglichen. Es ist somit zwar nicht falsch zu behaupten, dass der erste Gegenstand dann per Definition nicht mehr existiert, er wird nur in den Bereich des Möglichen verschoben.

Eine Folgerung aus diesen Definition ist das stärkste Argument für die Möglichkeit von Naturwissenschaft. Alles, was nicht beobachtet wurde, liegt im Bereich des Möglichen. Es ist also zulässig anzunehmen, das Unbeobachtete vom Möglichen durch geeignete Abstraktionen und assoziierte Messobjekte und Messgeräte ins Existierende zu verschieben.

Das Existierende und das Mögliche lässt sich auch in raumzeitlichen Begriffen ausdrücken. Eine Beobachtung befindet

sich stets im *Jetzt* und im *Hier* womit sich auch das Existierende immer im *Jetzt* und im *Hier* aufhält. Das Mögliche hingegen wohnt im *Vorher*, im *Nachher* und im *Anderswo*. Da das *Jetzt* und *Hier* als ein nicht zu fassendes, infinitesimales Raumzeitelement erscheint weist das *Vorher*, das *Nachher* und das *Anderswo* eine raumzeitliche Allgegenwärtigkeit auf. Im Bereich des Möglichen darf eine Abstraktion demzufolge als zeitlich und räumlich universell gültig angenommen werden, eine explizite Begründung für die allgegenwärtige Gültigkeit von physikalischen Gesetzen. Lassen Sie mich zusammenfassen: Alles, was beobachtet wird, existiert, alles, was nicht beobachtet wird, ist möglich.

### 6.3 Deutung der Physik

Nun möchte ich mit den gebildeten Begriffen die Möglichkeit von naturwissenschaftlicher Theoriebildung und insbesondere die Bedeutung physikalischer Theorien diskutieren. Wir hatten bereits gesehen, dass die Charakterisierung einer abstrahierten Beobachtung durch Abstraktionen eines Beobachters und definierte Eigenschaften mitsamt deren Ausprägungen ermöglicht wird. Weiterhin konnte versichert werden, dass parallele Beobachter zu gleichen Resultaten gelangen können, womit ein von Beobachtern unabhängiges Konzept durch deren bewusste Übereinkunft erreicht werden kann. Nachdem die Systematik der Theoriebildung erarbeitet wurde, möchte ich noch Stellung zur Bedeutung physikalischer Theorien beziehen und eine Möglichkeit zur Beantwortung der Frage, warum eine Übereinstimmung zwischen physikalischen Theorien und Experimenten beobachtet wird, geben.

#### Theoriebildung

Ziel der einer Theorie ist stets die einheitliche und raumzeitunabhängige Beschreibung eines Phänomens, damit Prognosen über zukünftiges Verhalten aufgestellt werden können. Gegenstand der Theoriebildung ist daher die Zusammenführung von Eigenschaften mitsamt deren Ausprägungen und deren gleichzeitige Abgrenzung gegenüber anderen Eigenschaften mitsamt Ausprägungen. Folglich fasst eine Theorie verschiedene Zustände einer abstrahierten Beobachtung zusammen.

Dass Zustände auf die in der Theorie durchgeführte Weise zusammenhängen, ist durch die Theorie definiert und ist damit nicht weiter begründbar. Diese Letztbegründung einer Theorie liegt daher in dem Prinzip, nach welchem sie Eigenschaften und Ausprägungen ordnet, welches wohlgermerkt selbst eine Eigenschaft ist. Eine Theorie führt ihren Begründungsanspruch daher immer auf das in ihr implementierte Prinzip zurück, welches nicht weiter begründet werden kann, da es schlichtweg nur definiert wurde. Eine Frage nach der Begründung dieses Prinzips kann nur im Rahmen einer anderen Theorie, welche die Eigenschaft *Prinzip* der abstrahierten Beobachtung *Theorie* zuordnet. Selbstverständlich verweist die neue Theorie auch auf ein nicht begründbares Prinzip, womit induktiv folgt, dass selbst eine finale Theorie keinen vollständigen Begründungsanspruch stellen darf. Dies setzt den Status einer Theorie auf eine *Beschreibung*. Entsprechend enthält eine Theorie Begründungen, nämlich die Rückführung auf das zugrunde gelegte Prinzip, sie selbst ist aber nicht von begründender Natur.

Die Systematik der Theoriebildung ist schematisch in Abb. 12 dargestellt.

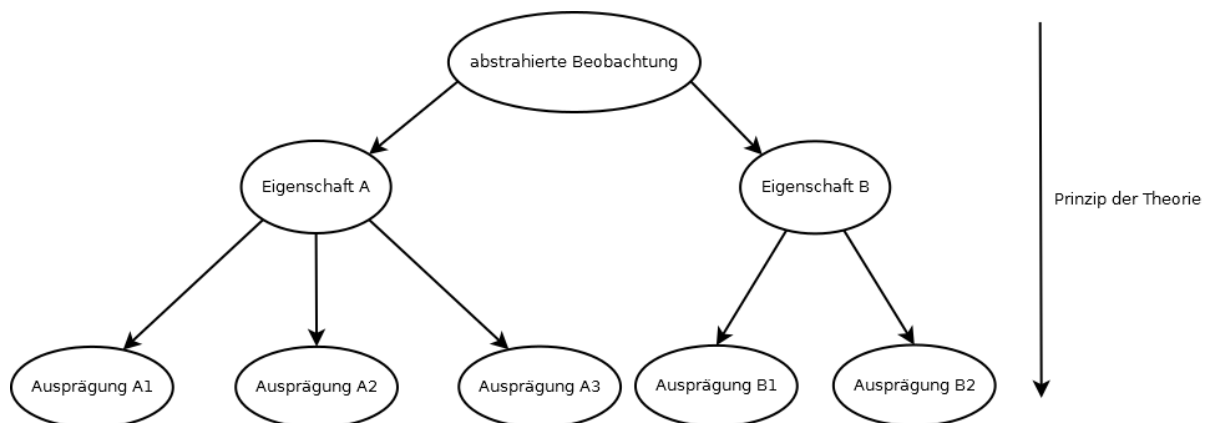


Abbildung 12: Systematik der Theoriebildung

#### Bedeutung einer physikalischen Theorie

Für die physikalische Theoriebildung muss bedacht werden, dass auch Wechselwirkungen Messobjekte sein können, weshalb eine physikalische Theorie stets ihre Entitäten inklusive ihrer Wechselwirkungen beschreibt. Jede physikalische Entität besitzt also die Eigenschaft, auf eine bestimmte Weise mit anderen physikalischen Entitäten in Wechselwirkung treten zu können, wobei die Ausprägung dieser Eigenschaft durch einen funktionalen Zusammenhang der Ausprägungen in der Theorie gegeben ist. Beispielsweise gilt in der speziellen Relativitätstheorie, dass die Eigenschaft *Ruhemasse*  $m_0$  mit der Eigenschaft *Ruheenergie*  $E_0$  über den funktionalen Zusammenhang  $E_0 = m_0 c^2$  der quantitativen Ausprägungen



---

verknüpft ist. Funktionale Zusammenhänge artikulieren sich also bei quantitativen Ausprägungen, aber auch qualitative Ausprägungen spielen in der Physik eine Rolle. Langfristiges Ziel der Physik ist es jedoch, Phänomene auf eine quantitative Art zu beschreiben, weswegen sie sich auch standardmäßig der Mathematik als Hilfsmittel bedient.

Als Beispiel dafür möchte ich kurz die Theorie des Lichts, welche durch die Elektrodynamik gegeben ist, betrachten. Wir beobachten das Phänomen, dass jeder Gegenstand die Eigenschaft *Farbe* besitzt. Jenes wird qualitativ durch die beispielhaften Ausprägungen *blau* und *rot* beschrieben. Die Physik möchte dieses Phänomen quantifizieren. Dazu wird der Eigenschaft *Farbe* die physikalische Eigenschaft *Wellenlänge*  $\lambda$  zugeordnet, dessen quantitative Ausprägungen mit den qualitativen Ausprägungen der Eigenschaft *Farbe* über eine Relation verknüpft sind. So kann der Ausprägung *blau* ein Wert von ungefähr 500 nm und der Ausprägung *rot* ein Wert von ca. 750 nm zugeordnet werden.

Als nächstes möchte ich mich der Frage zuwenden, warum eine Übereinstimmung von theoretisch berechneten und experimentell gemessenen Werten abstrahiert beobachtet werden kann und sich manche Theorie als hinreichend genau, das heißt *alsbrauchbar*, herausstellen und andere nicht. Der Gedankengang beginnt beim Verhältnis von Messobjekt zu Messgerät. Per Definition sind jene zueinander assoziiert, so dass physikalische Eigenschaften und damit auch Theorien nur auf beide zugleich angewandt werden dürfen. Daraus folgt, dass ein Messobjekt stets nur die Zustände zeigt, welche auch in der dazu assoziierten und manifestierten Abstraktion, dem Messgerät, implementiert wurden. Die Charakterisierung des Messgerätes erfolgte allerdings durch die physikalische Theorie, womit sich der Kern einer jenen offenbart: Physikalische Theorien erweisen sich als *brauchbar*, weil sie so gemacht wurden. Messgerät und Messobjekt liegt die gleiche Abstraktion zugrunde und da Erkenntnis nur aus der abstrahierten Beobachtung ihres Zusammenspiels gezogen werden kann, müssen sich bei ihnen Übereinstimmungen zeigen.

Das wirft natürlich die Fragen auf, warum manche Theorien falsifiziert werden können oder warum Theorien einen endlichen Gültigkeitsbereich aufweisen und eventuell in eine übergeordnete Theorie übergehen. Ersteres lässt sich mit dem in einer Theorie zugrunde gelegtes Prinzip beantworten. Durch Abstraktion wurden Messgeräte und Messobjekte assoziiert. Jene Assoziation erfolgt nach einem Prinzip, da die auf der Ebene der Abstraktionen stattfindet und damit Teil des menschlichen Denkens ist, welches in Begriffen und Prinzipien operiert. Die Theoriebildung, welche ebenfalls einer Abstraktion entspricht, erfolgt auch nach einem Prinzip, womit der Fall klar ist. Eine Theorie erweist sich als *brauchbar*, wenn eine Übereinstimmung zwischen dem in der Assoziation und dem in der Theorie zugrunde gelegten Prinzip erreicht wird und als *unbrauchbar*, wenn dies nicht erreicht wird. Die Physik beschäftigt sich auf elementarer Ebene also mit der Zuordnung von Prinzipien auf der Ebene der Abstraktionen.

Die zweite Frage präzisiert diese Überlegungen. Bekanntlicherweise sind manche physikalische Theorien besser dazu geeignet als andere, ein und dasselbe Phänomen zu beschreiben. Dies führt in der gängigen Praxis schnell zu dem Schluss, dass die Natur sich nach bestimmten Gesetzen verhält und diese Schritt für Schritt aufgedeckt werden, wobei jeder weitere Schritt den vorigen nicht negiert, sondern als Grenzfall enthält. Selbstverständlich widerspreche ich dieser Vorstellung mit dem Verweis darauf, dass die erstmalige Beobachtung der Ungültigkeit einer physikalischen Theorie in einem bisher unbekanntem Bereich keineswegs den Schluss zulässt, dass es sich um *ein und dasselbe* Phänomen handelt. Ich erinnere daran, dass Gleichheit nur auf der Ebene der Abstraktionen angewandt werden darf und die Einarbeitung einer neuen abstrahierten Beobachtung einer Definition gleichkommt. Dies hat zwei wesentliche Konsequenzen. Zum einen folgt daraus, dass in einem Messobjekt und dem assoziierten Messgerät stets nur eine bisherige physikalische Theorie implementiert ist. Erst, wenn die Kombination aus Messobjekt und Messgerät eine neue Beobachtung liefert werden andere Abstraktionen in jene implementiert. Beispielsweise kann ein Messgerät, welches die Zeit- und Längenangaben für ein Objekt, welches sich mit einer Geschwindigkeit  $v$  klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit  $c$  ( $v \ll c$ ) bewegt, keine Effekte der Längenkontraktion oder Zeitdilatation aufzeigen, da das Prinzip der Assoziation zwischen Messgerät und Messobjekt in der newtonschen Mechanik die Absolutheit der Raumzeit beinhaltet. Dass sich relativistische Effekte bei hohen Geschwindigkeiten ( $v \approx c$ ) zeigen, ist somit ausschließlich durch dein anderes zugrunde gelegtes Prinzip bedingt. Die Übereinstimmung zwischen spezieller Relativitätstheorie und newtonscher Mechanik ist damit nicht mehr die Folge einer auf festen physikalischen Gesetzen basierenden Welt, sondern auf der Ebene der Abstraktionen als *gleich* definiert, obwohl die zugrunde gelegten Prinzipien *ungleich* sind und die Prognosen über das Verhalten in extremen physikalischen Situationen (hier:  $v \approx c$ ) ebenfalls *ungleich* sind. Dass manche physikalischen Theorien genauere Ergebnisse liefern, ist nicht dadurch begründet, dass sie ein *genaueres* oder allgemein *besseres* Modell der Natur abgeben, sondern einzig und allein dadurch, dass die in ihnen zugrunde gelegten Prinzipien den Raum zur Übereinstimmung, welcher in der Assoziation der Messobjekte zu Messgeräten implementiert ist, verkleinern. Bitte nehmen Sie mir es nicht zu übel, wenn ich diese Erkenntnis plump zusammenfasse mit den Worten *Theorien sind besser, weil sie besser sind*.

Weiterhin zielen physikalische Theorien nicht auf das *Existierende*, sondern auf das *Mögliche* ab, da sie den Anspruch auf raumzeitliche Allgemeingültigkeit erheben, welcher im *Möglichen* akzeptiert werden kann. Die Fusion mit dem *Existierenden* ergibt sich dann durch die Implementierung von neuen abstrahierten Beobachtungen. Die Übereinstimmung von Theorie und Experiment wird demnach nicht im Moment des Experiments, also im *Existierenden*, sondern *danach*, also im *Möglichen*, erreicht.

Zuletzt möchte ich bemerken, dass eine physikalische Theorie nach diesem Verständnis prinzipiell *nie* vollständig sein wird. Eine *Theory of Everything* oder *Weltformel* kann nicht formuliert werden. Meine Begründung für diese These liegt

---

in der Systematik der Theoriebildung. Jene beruht auf der zumeist quantitativen Zuordnung von Eigenschaften und Ausprägung, wozu die Abstraktionen *Gleichheit* und *Ungleichheit* verwendet werden. Jene wurden als komplementär identifiziert, womit in jeder Theoriebildung sowohl die *Zusammenführung* (Nutzung von Gleichheit) als auch die *Abtrennung* (Nutzung von Ungleichheit) von Eigenschaften und Ausprägungen auftaucht. Und genau darin liegt das Problem. Eine *Theory of Everything* müsste *alle* Phänomene unter einer abstrahierten Beobachtung zusammenfassen, also in mindestens einem Abstraktionsschritt auf der Ebene der Abstraktionen ausschließlich *Gleichheit* verwenden. Dies ist durch die Komplementarität zur Ungleichheit wie oben beschrieben nicht möglich, es würde lediglich eine triviale Aussage ohne Informationsgehalt folgen.

Ich denke mit diesem Abschnitt konnte hinreichend gezeigt werden, dass die Möglichkeit einer physikalischen Naturwissenschaft von selbst aus der im vorigen Abschnitt eingeführten Terminologie gefolgt ist. Weiterhin konnten die aufgeworfenen Fragen von grundsätzlicher Natur im hiesigen Kontext beantwortet werden. Ich sehe darin die große Stärke der vorgestellten Ansätze für eine Theorie der absoluten Beobachtung. Das Wesen der Physik musste nicht postuliert werden und der Erfolg der Physik erscheint nicht mehr als zufällig, sondern folgt von selbst.

---

#### 6.4 Modaler quantenmechanischer Messprozess

---

Im letzten Abschnitt möchte ich die Überlegungen auf den quantenmechanischen Messprozess anwenden, wobei die kausalen Strukturen zu Gunsten eines modalen Verständnisses weichen werden.

##### Folgerungen für Kausalität

Bereits bei der Analyse des Verhältnisses von Beobachter und Beobachtetem zeigte sich, dass die Beobachtung dem Beobachter und dem Beobachteten zur *Koexistenz* verhilft. Es ergeben sich keine *direkten* kausalen Strukturen nach einer Beobachtung, der Beobachter folgert seine Existenz im gleichen Zug wie er die Existenz des Beobachteten folgert. Lediglich die Beobachtung hat *direkten* kausalen Charakter. Lassen Sie mich dazu die Betrachtungen aus Abschnitt 4.1 durchführen, wobei ich Aristoteles gerne außen vor lassen möchte. Die stärkste Wirkung zeigt sich bei Hume. Die Humesche Metaphysik macht aus der Kausalität eine Regelmäßigkeit, welche durch eine neuartige Beobachtung stets unterbrochen werden kann. Im hiesigen Zusammenhang ergibt sich ein völlig anderes Bild. Die Beobachtung ist per Definition der Ursprung von allem und es ist nicht möglich, nicht zu beobachten. Die Beobachtung ist damit *immer* von ursächlicher Natur. Die Probleme der Humeschen Metaphysik, welche bei Mackie durch die INUS-Bedingung und bei Lewis durch das Kontrafaktische aufgegriffen wurden, tauchen erst gar nicht auf. So lässt sich die INUS-Bedingung nicht anwenden, da die Beobachtung sowohl Teil der Bedingung, als auch die Bedingung ist (es gibt keine weiteren Teile der Bedingung, da die Beobachtung der Ursprung von allem ist), womit sie gleichzeitig hinreichend, nicht hinreichend, notwendig und nicht notwendig ist, was einem Widerspruch entspricht. Außerdem ist das Kontrafaktische undefiniert, da das Nicht-Eintreten einer Beobachtung dem Nicht-Beobachten entspricht, welches per Definition nicht möglich ist. Bei Kant ist Kausalität eine Vernunftkategorie *a priori*. Dies kommt diesem Gedankengang zwar näher, erweist jedoch trotzdem als inkompatibel zur kausalen Wirkung der Beobachtung, da Kant Kausalität als Mittel zum Urteil ansieht, um Erkenntnisse aus Beobachtungen zu gewinnen, wohingegen die Kausalität der Beobachtung keinerlei Erkenntnis mit sich bringt. Sie ist durch die Absolutheit der Beobachtung gegeben, mehr nicht.

Beachten Sie, dass wenn man den Kausalitätsbegriff auf die abstrahierten Beobachtungen anwenden möchte sich die selben Möglichkeiten (und die selben Probleme) wie in Abschnitt 4.1 ergeben. Eine gesonderte, unmittelbare Stellung nimmt Kausalität nur für die Beobachtung ein.

##### Beschreibung mit Modalität

Schon die bisherige Analyse zeigte, dass das Verhältnis von Messobjekten und Messgeräten auf Assoziation beruht, das heißt, dass jedes der beiden einen Möglichkeitsraum für den anderen und sich selbst generiert. Messgerät und Messobjekt sind durch *Koexistenz*, durch *gegenseitiges* Bedingen charakterisiert. Eine kausale Wirkung, das heißt eine strikt auszumachende einseitige Wirkung war nicht zu vermerken. Eine passendere Beschreibung erfolgt daher durch *Modalität*. Es sind keine *Ursachen* und *Wirkungen* beobachtbar, sondern *Koexistenzen*, welche durch zwei Möglichkeitsräume bestehen. Die Assoziation eines Messgeräts zu einem Messobjekt stellt für jeden einen Möglichkeitsraum zur Verfügung, in welchem die Zustände beider korreliert sind. Kausale Aussagen in physikalischen Theorien schießen also in gewisser Weise über das Ziel hinaus. Die Assoziation von Messgeräten zu Messobjekten erlaubt zwar die *Definition* von kausalen Strukturen, jedoch geht selbst eine kausale Wirkung in die beidseitige *Koexistenz* auf. Die Annahme von kausalen Strukturen ist demnach *nicht* falsch, sondern schlichtweg unpraktisch. Wie komplex die Betrachtungen zu Kausalität, deren Richtungen in einem System et cetera führen können hat Abschnitt 5.2 in aller Deutlichkeit gezeigt. Mit Modalität hingegen wird keiner der beteiligten Instanzen gegenüber den anderen auf eine bedingende Weise ausgezeichnet, jede Wechselwirkung führt zu koexistenten Zuständen. Anschaulich gesagt bringt jedes Messobjekt inklusive assoziiertem Messgerät einen ursächlichen und einen wirkenden Einfluss mit sich, so dass die Modalität in der Symmetrie von Kausalität aufgeht. Beispielweise ist die Erde die Ursache für das Fallen eines Steines (entspricht einer Wirkung) in der Nähe ihrer Oberfläche, gleichzeitig ist aber auch der Stein die Ursache für das Fallen der Erde (entspricht ebenfalls einer Wirkung).

---

### Modalität im quantenmechanischen Messprozess

Wechselwirkungen artikulieren sich stets modal. In den Überlegungen zur (abwärtsgerichteten) Kausalität im quantenmechanischen Messprozess (vgl. Abschnitt 5.3.2) wurde sozusagen versucht das Modale ins Kausale aufzubrechen. Dabei lässt sich der quantenmechanische Messprozess bestens in den Begriffen eines modalen Konzepts unter absoluter Beobachtung verstehen. Besonders deutlich wird die von Bohr angesprochene Problematik, dass Messgeräte in klassischen und Messobjekte der Quantenmechanik in quantenmechanischen Begriffen beschrieben werden müssen, wodurch eine unüberbrückbare Differenz entsteht. Offenbar wurden in der Assoziation von Messgeräten zu Messobjekten zwei Theorien mit sich widersprechenden zugrunde gelegten Prinzipien gleichzeitig implementiert. Da aber jede Theorie für sich das Prinzip der Assoziation zu beschreiben versucht, scheitert die gleichzeitige Anwendung. Es bieten sich nur zwei Auswege an. Entweder muss das Messgerät ebenfalls im Rahmen der Quantenmechanik beschrieben werden, oder es muss eine Theorie entworfen werden, welcher ein Prinzip zugrunde liegt, das die gleichzeitige Implementierung von konkurrierenden Prinzipien ermöglicht. Letzteres ist zweifellos nicht im Sinne einer physikalischen Beschreibung, weswegen nur einheitliche Theorie Abhilfe schaffen kann. Selbstverständlich ist diese Folgerung trivial und wohlbekannt, mein Anliegen galt mehr der Herausarbeitung, warum die gleichzeitige Beschreibung in klassischen und quantenmechanischen Begriffen scheitert.

Die modale Beschreibung möchte ich an zwei Beispielen aus Abschnitt 2.4 zeigen. Das erste Beispiel ist die Welcher-Weg-Information am Doppelspalt (vgl. Abschnitt 2.4.4). Wir erinnern uns, dass das Interferenzmuster im Falle der Detektion von Photonen unmittelbar hinter einem der beiden Spalte verschwand, was wir mit dem *Welle-Teilchen-Dualismus* erklären konnten. Führen wir dies nun in modalen Begriffen durch. Für das Messgerät, welches hier den gesamten Versuchsaufbau repräsentiert, und das Messobjekt, dies entspricht hier dem Licht, welches ein Muster auf dem Schirm erzeugt, existieren zwei Theorien, welche das Prinzip zur Assoziation von Messobjekt zu Messgerät beschreiben. Die klassische Theorie enthält ein Prinzip, welches auf der Vorstellung von Teilchen beruht, der quantenmechanische Theorie liegt das Prinzip von Wellen zugrunde. Jede Theorie liefert einen Möglichkeitsraum für die Zustände von Messobjekt und assoziiertem Messgerät. Da die zugrunde gelegten Prinzipien der Theorien verschieden sind, müssen auch die damit verknüpften Möglichkeitsräume verschieden sein. Je nach realisiertem Aufbau, das heißt je nach konkreter Assoziation von Messobjekt zu Messgerät verhält sich die abstrahierte Beobachtung entsprechend der die Assoziation beschreibenden Theorie. Dass sich in einem Fall klassisches und im anderen Fall quantenmechanisches Verhalten zeigt, ist also nicht durch den konkreten Versuchsaufbau beziehungsweise den Kontext *verursacht*, da dem Versuchsaufbau die Prinzipien der implementierten Theorien vorausgehen. Der Aufbau selektiert damit nicht aktiv, ob sich die Wellennatur oder die Teilchennatur des Lichts zeigt, sondern stellt einen von zwei strikt getrennten assoziierten Möglichkeitsräumen bereit. Eine Selektion erfolgt nur beidseitig, Experiment und Theorie selektieren sich gegenseitig, womit deren Verhältnis durch Modalität beschrieben werden muss. Der *Welle-Teilchen-Dualismus* geht demnach in zwei *separate* Möglichkeitsräume auf.

Das zweite Beispiel behandelt Schrödingers Katze (vgl. Abschnitt 2.4.1), welches das Messproblem der Quantenmechanik besonders drastisch illustrieren sollte. Das Messobjekt (die Katze) konnte sich in einer Superposition von Eigenzuständen befinden, wohingegen das Messgerät (Geigersches Zählrohr) nur Eigenzustände registrieren konnte. Diese Reduktion wurde in Abschnitt 5.3.2 als abwärtsgerichtete Kausalität durch Selektion seitens des Geigerschen Zählrohrs identifiziert. In modalen Begriffen zeichnet sich ein ähnliches Bild ab wie zuvor. Der Assoziation von Messobjekt zu Messobjekt liegen zwei unterschiedliche durch Theorien beschriebene Prinzipien zugrunde. Bei der separaten Beschreibung jeder Instanz durch nur eine Theorie ergeben sich unweigerliche Inkonsistenzen, welche sich in der Inkompatibilität der Möglichkeitsräume äußert. Das Problem liegt also darin, dass die Möglichkeitsräume nicht quantitativ assoziiert sind, was nur durch eine umfassende Beschreibung korrigiert werden kann. Da der Möglichkeitsraum des Messobjekts (bestehend aus allen Superpositionen der Eigenzustände) den Möglichkeitsraum des Messgeräts (bestehend aus allen Eigenzustände) enthält und weil die quantenmechanische Beschreibung des Messobjekts Wahrscheinlichkeitsaussagen für die koexistierenden Zustände im Möglichkeitsraum des Messgeräts bereithält, kann eine separate Beschreibung der Instanzen nur qualitative Assoziationen erfassen. Dies mündet in eine nicht quantitative Regel der Reduktion von Zuständen. Auch in diesem Beispiel lässt sich die Problematik in modalen Begriffen fassen, welche die einseitige kausale Selektion durch eine beidseitige Koexistenz von nicht assoziierten Möglichkeitsräumen ersetzt.

### Abschließende Bemerkungen

Meine Intention bestand darin, eine von Grund auf theoretische Beschreibung zu erarbeiten. Ausgehend von erkenntnistheoretischen Überlegungen konnte ein modales Verständnis des quantenmechanischen Messprozesses als eine *Alternative* zur entwickelt werden. Dies erwies sich als zutreffend und performant zur Aufdeckung der Problematik des Messproblems von einem anderen Standpunkt aus. Ich möchte abschließend klarstellen, dass damit keineswegs die *Falschheit* der Überlegungen zur abwärtsgerichteten Kausalität gezeigt wurde. Ich habe lediglich eine meiner Meinung nach konsistentere Beschreibung geben wollen, welche im Standard der Philosophie vom Allgemeinen ins Spezielle argumentiert, womit die Diskussion natürlich nicht erledigt ist. Es gilt das Messproblem weiter verschieden zu beleuchten und so lange umzuformulieren, bis dessen Lösung trivial ist.

---

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

---

In dieser Arbeit wurden Formen von abwärtsgerichteter Kausalität im quantenmechanischen Messprozess untersucht. Die von George Ellis vorgeschlagenen Betrachtungen zur abwärtsgerichteten Kausalität erwiesen sich auf die verschiedenen Interpretationen der Quantenmechanik anwendbar und lieferten eine Möglichkeit, das Messproblem der Quantenmechanik neu zu fassen.

Es zeigten sich jedoch Schwächen des Ansatzes von abwärtsgerichteter Kausalität im Rahmen der philosophischen Diskussion rund um Kausalität, welche hauptsächlich auf der fehlenden Präzision bei der Begriffsdefinition beruhten. Weiterhin erwiesen sich die Überlegungen zum quantenmechanischen Messprozess als stark abhängig von der zugrunde gelegten Interpretation und der damit einhergehenden erkenntnistheoretischen Vorstellung, weshalb die Anwendung von abwärtsgerichteter Kausalität verschiedene Resultate für die unterschiedlichen Interpretationen mit sich brachte.

Von den philosophischen Unstimmigkeiten ausgehend konnte ein auf erkenntnistheoretischen Überlegungen beruhendes Konzept der absoluten Beobachtung erarbeitet werden, welches die gängigen Vorstellungen der modernen Physik reproduzierte und einen sauberen begrifflichen Rahmen zur Diskussion des quantenmechanischen Messprozesses lieferte. Dabei erwies sich eine modale Beschreibung des quantenmechanischen Messprozesses als performant, wobei kausale Strukturen nicht vollständig abgelehnt, sondern durch ihre Symmetrie in modale Strukturen übersetzt wurden.

Da sowohl abwärtsgerichtete Kausalität als auch Modalität im quantenmechanischen Messprozess identifiziert werden konnte, darf die weitere Diskussion in beiden Richtungen fortgeführt werden. Es gilt das Konzept der abwärtsgerichteten Kausalität von seinem komplexen Rahmen zu befreien und auf wenige simple Definitionen zu reduzieren. Das Konzept von Modalität in einem Vorschlag für eine Theorie der absoluten Beobachtung kann weiter präzisiert werden und in der philosophischen Diskussion erweitert werden. So sind weitere Folgerungen für die Bedeutung der Physik und deren Grundbegriffe ebenso denkbar wie ethische und moralische Ableitungen, welche auf das Postulat der Absolutheit der Beobachtung jedes Beobachters zurückgeführt werden können.

---

## Literatur

---

- [1] W. Heisenberg, "Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik," *Zeitschrift für Physik*, vol. 43, no. 3, pp. 172–198, 1927.
- [2] N. Bohr, "Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik," *Die Naturwissenschaften*, vol. 16, no. 15, pp. 245–257, 1928.
- [3] H. Everett, "'Relative State' Formulation of Quantum Mechanics," *Reviews of Modern Physics*, vol. 29, no. 3, pp. 454–462, 1957.
- [4] D. Bohm, "A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables. I," *Physical Review*, vol. 85, no. 2, pp. 166–179, 1952.
- [5] D. Bohm, "A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables. II," *Physical Review*, vol. 85, no. 2, pp. 180–193, 1952.
- [6] E. Schrödinger, "Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik," *Die Naturwissenschaften*, vol. 23, no. 48, pp. 807–812, 1935.
- [7] H. D. Zeh, "On the Interpretation of Measurement in Quantum Theory," *Foundations of Physics*, vol. 1, no. 1, pp. 69–76, 1970.
- [8] D. T. Campbell, "'Downward Causation' in Hierarchically Organised Biological Systems," in *Studies in the Philosophy of Biology* (F. J. Ayala and T. Dobzhansky, eds.), pp. 179–186, Macmillan Education UK, 1974.
- [9] G. F. Ellis, "Recognising Top-Down Causation." <https://arxiv.org/abs/1212.2275>, (zuletzt abergerufen 08.08.2016), 2012.
- [10] G. F. Ellis, "Top-down causation and emergence: some comments on mechanisms," *Interface Focus*, vol. 2, no. 1, pp. 126–140, 2012.
- [11] G. Auletta, G. F. R. Ellis, and L. Jaeger, "Top-down causation by information control: From a philosophical problem to a scientific research program," *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 5, no. 27, pp. 1159–1172, 2008.
- [12] F. Schwabl, *Quantenmechanik: Eine Einführung*. Springer Verlag, 7. ed., 2007.
- [13] W. Nolting, *Grundkurs Theoretische Physik 5/1: Quantenmechanik - Grundlagen*. Springer Verlag, 7. ed., 2009.
- [14] M. Bartelmann, B. Feuerbacher, T. Krüger, D. Lüst, A. Rebhan, A. Wipf, F. Modler, and M. Kreh, *Theoretische Physik*. Springer Verlag, 2015.
- [15] D. J. Griffiths, *Quantenmechanik. Lehr- und Übungsbuch*. Pearson, 2. ed., 2012.
- [16] J. von Neumann, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Springer, 2. ed., 1996.
- [17] C. Davisson and L. H. Germer, "Diffraction of Electrons by a Crystal of Nickel," *Physical Review*, vol. 30, no. 6, pp. 705–740, 1927.
- [18] L. de Broglie, "The Reinterpretation of Wave Mechanics," *Foundations of Physics*, vol. 1, no. 1, pp. 5–15, 1970.
- [19] C. Jönsson, "Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten," *Zeitschrift für Physik*, vol. 161, no. 4, pp. 454–474, 1961.
- [20] E. Schrödinger, "Quantisierung als Eigenwertproblem," *Annalen der Physik*, vol. 384, no. 4, pp. 361–376, 1926.
- [21] M. Born, "Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge," *Zeitschrift für Physik*, vol. 37, no. 12, pp. 863–867, 1926.
- [22] N. Bohr, "Causality and complementarity," *Philosophy and Science*, vol. 4, pp. 289–298, 1937.
- [23] W. Heisenberg, "Über quantentheoretische umdeutung kinematischer und mechanischer beziehungen," *Z. Physik (Zeitschrift für Physik)*, vol. 33, no. 1, pp. 879–893, 1925.
- [24] M. Born and P. Jordan, "Zur Quantenmechanik," *Zeitschrift für Physik*, vol. 34, no. 1, pp. 858–888, 1925.



- [25] M. Born, W. Heisenberg, and P. Jordan, "Zur Quantenmechanik II," *Zeitschrift für Physik*, vol. 35, no. 8-9, pp. 557–615, 1926.
- [26] E. Schrödinger, "Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinem," *Annalen der Physik*, vol. 384, no. 8, pp. 734–756, 1926.
- [27] P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*. Clarendon Press, 4. ed., 1978.
- [28] W. Kaballo, "Hilberträume und Quantenmechanik: Vorlesungsnotizen." <http://www.mathematik.uni-dortmund.de/lisi/kaballo/Hilbert/Kap1-10.pdf>, (zuletzt abgerufen am 08.08.2016), 2011.
- [29] W. Heisenberg, G. Rasche, and B. L. van der Waerden, *Physik und Philosophie*. Hirzel, 7. ed., 2007.
- [30] W. E. Lamb, "An Operational Interpretation of nonrelativistic Quantum Mechanics," *Physics Today*, vol. 22, no. 4, p. 23, 1969.
- [31] K. Meyenn, *Wolfgang Pauli: Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a. Band II: 1930-1939*. Springer, 1985.
- [32] E. P. Wigner, "Remarks on the Mind-Body Question," in *The Scientist Speculates. An Anthology of partly-baked Ideas* (I. J. Good, ed.), pp. 284–302, Heinemann, 1962.
- [33] J.-M. Schwindt, *Tutorium Quantenmechanik*. Springer Verlag, 2. ed., 2016.
- [34] W. Heisenberg, "The Representation of Nature in Contemporary Physics," *Daedalus*, vol. 87, no. 3, pp. 95–108, 1958.
- [35] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?," *Physical Review*, vol. 47, no. 10, pp. 777–780, 1935.
- [36] A. Einstein, H. Born, and M. Born, *Briefwechsel 1916 - 1955*. Rowohlt, 1972.
- [37] M. Born and A. Einstein, *Albert Einstein, Max Born. Briefwechsel 1916-1955*. Nymphenburger, 1955.
- [38] J. S. Bell, "On the Einstein Podolsky Rosen Paradox," *Physics*, no. 1, pp. 195–200, 1964.
- [39] J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony, and R. A. Holt, "Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories," *Physical Review Letters*, vol. 23, no. 15, pp. 880–884, 1969.
- [40] T. Haas and K. van Beek, "Versuch 4.2: Test der Bellschen Ungleichung." Fortgeschrittenenpraktikum der TU Darmstadt, 2016.
- [41] F. Selleri, *Quantum Mechanics Versus Local Realism: The Einstein-Podolsky-Rosen Paradox*. Plenum Press, 1988.
- [42] S. J. Freedman and J. F. Clauser, "Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories," *Physical Review Letters*, vol. 28, no. 14, pp. 938–941, 1972.
- [43] M. Laméhi-Rachti and W. Mittag, "Quantum mechanics and hidden variables: A test of Bell's inequality by the measurement of the spin correlation in low-energy proton-proton scattering," *Physical Review*, vol. 14, no. 10, pp. 2543–2555, 1976.
- [44] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. L. Sands, *Feynman Vorlesungen über Physik, Band III: Quantenmechanik*. Oldenbourg, 1971.
- [45] T. Walther, "Fachkurs Optik: Vorlesungsnotizen." TU Darmstadt, 2015.
- [46] W. Heisenberg, "The Development of the Interpretation of the Quantum Theory," in *Niels Bohr and the Development of Physics* (N. Bohr and W. Pauli, eds.), Pergamon, 1955.
- [47] C. F. v. Weizsäcker, *Die Einheit der Natur: Studien*. Hanser, 5. ed., 1979.
- [48] W. Heisenberg and J. Busche, *Quantentheorie und Philosophie: Vorlesungen und Aufsätze*. Reclam, 2003.
- [49] B. S. DeWitt, "Quantum mechanics and reality," *Physics Today*, vol. 23, no. 9, p. 30, 1970.



- 
- [50] L. de Broglie, “La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement,” *Journal de Physique et le Radium*, vol. 8, no. 5, pp. 225–241, 1927.
- [51] D. Dürr, *Bohmsche Mechanik als Grundlage der Quantenmechanik*. Springer Verlag, 2001.
- [52] H. D. Zeh, “Dekohärenz und andere Quantenmissverständnisse: Beitrag zum Didaktik-Workshop Physik an der TU Karlsruhe.” <http://www.rzuser.uni-heidelberg.de/~as3/KarlsruheText.pdf>, (zuletzt abgerufen am 08.08.2016), 2009.
- [53] F. Embacher, “Grundidee der Dekohärenz.” <http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Quantentheorie/Dekohaerenz/>, (zuletzt abgerufen am 08.08.2016), 2016.
- [54] H. van Hees, “Der Meßprozess in der Quantenmechanik.” <http://theory.gsi.de/~vanhees/faq-pdf/mess.pdf>, (zuletzt abgerufen am 08.08.2016), 1998.
- [55] E. Joos, H. D. Zeh, C. Kiefer, D. Giulini, J. Kupsch, and I.-O. Stamatescu, *Decoherence and the appearance of a classical world in quantum theory*. Springer Verlag, 2. ed., 2003.
- [56] A. Aurelius and O. F. Lachman, *Die Bekenntnisse des heiligen Augustinus*. Reclam, 1888.
- [57] A. Falcon, “Aristotle on Causality.” <http://plato.stanford.edu/entries/aristotle-causality/>, (zuletzt abgerufen am 08.08.2016), 2015.
- [58] D. Hume and J. Kulenkampff, *Eine Untersuchung über den menschlichen Verstand*. Meiner, 12. ed., 2005.
- [59] D. Hume, R. Brandt, and H. D. Brandt, *Ein Traktat über die menschliche Natur. Band 1 - Buch 1: Über den Verstand*. Meiner, 2013.
- [60] I. Kant, J. Timmermann, and H. Klemme, *Kritik der reinen Vernunft*. Meiner, 1998.
- [61] J. L. Mackie, “Causes and conditions,” *American Philosophical Quarterly*, no. 2, pp. 245–264, 1965.
- [62] D. Lewis, “Causation,” *The Journal of Philosophy*, vol. 70, no. 17, pp. 556–567, 1973.
- [63] D. Lewis, *Philosophical papers: Volume II*. Oxford University Press, 1986.
- [64] D. Lewis, “Causation as Influence,” *The Journal of Philosophy*, vol. 97, no. 4, pp. 182–197, 2000.
- [65] K. Kassner, “Kausalität.” <http://wase.urz.uni-magdeburg.de/kassner/srt/crashcourse/kausalitaet.html>, (zuletzt abgerufen am 08.08.2016), 1998.
- [66] I. Newton and A. Koyré, *Isaac Newton’s Philosophiae naturalis principia mathematica*. Cambridge University Press, 1972.
- [67] W. Nolting, *Grundkurs Theoretische Physik 1: Klassische Mechanik*. Springer Verlag, 9. ed., 2011.
- [68] W. Nolting, *Grundkurs Theoretische Physik 2: Analytische Mechanik*. Springer Verlag, 7. ed., 2006.
- [69] J. Wambach and B. Drossel, “Einführung in die Theoretische Physik: Vorlesungsnotizen.” TU Darmstadt, 2008.
- [70] J. C. Maxwell, “A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 155, pp. 459–512, 1865.
- [71] B. Drossel, “Klassische Elektrodynamik: Vorlesungsnotizen.” TU Darmstadt, 2015.
- [72] W. Nolting, *Grundkurs Theoretische Physik: 3: Elektrodynamik*. Springer Verlag, 10. ed., 2013.
- [73] A. Einstein, “Zur Elektrodynamik bewegter Körper,” *Annalen der Physik*, vol. 322, no. 10, pp. 891–921, 1905.
- [74] A. Einstein, “Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?,” *Annalen der Physik*, vol. 323, no. 13, pp. 639–641, 1905.
- [75] A. Einstein, “Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie,” *Annalen der Physik*, vol. 354, no. 7, pp. 769–822, 1916.

- 
- [76] S. W. Hawking and R. Penrose, "The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 314, no. 1519, pp. 529–548, 1970.
- [77] M. Born, *Physik im Wandel meiner Zeit*. Vieweg Teubner Verlag, 2013.
- [78] W. Heisenberg, "Kausalgesetz und Quantenmechanik," *Erkenntnis*, vol. 2, no. 1, pp. 172–182, 1931.

---

## Abbildungen

---

- [A] Uni Frankfurt Physik. *Klassische Bahnkurve*.  
URL: [https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/lm\\_data/lm\\_324/daten/bild\\_1/01\\_0240.gif](https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/lm_data/lm_324/daten/bild_1/01_0240.gif)
- [B] ETH Zürich Physik. *Wellenfunktion und Wahrscheinlichkeitsdichte*.  
URL: <http://qudev.phys.ethz.ch/content/science/BuchPhysikIV/PhysikIV2024x.png>
- [C] Wikipedia. *Gedankenexperiment Schrödingers Katze*.  
URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/91/Schrodingers\\_cat.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/91/Schrodingers_cat.svg)
- [D] Wikipedia. *Intensitätsverteilung am Doppelspalt ohne Interferenz*.  
URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/83/2Slits-particles\\_only.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/83/2Slits-particles_only.jpg)
- [E] Wikipedia. *Intensitätsverteilung am Doppelspalt mit Interferenz*.  
URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/95/2slits\\_quantum.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/95/2slits_quantum.jpg)
- [F] Wikipedia. *Viele-Welten-Interpretation am Beispiel von Schrödingers Katze*.  
URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c8/Schroedingers\\_cat\\_film.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c8/Schroedingers_cat_film.svg)
- [G] Wikipedia. *Bohmsche Trajektorien am Doppelspalt*.  
URL: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/02/Doppelspalt.svg>
- [H] Wikipedia. *Minkowski-Diagramm für zwei Koordinatensysteme  $(x, t)$  und  $(x', t')$* .  
URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/db/Minkowski\\_lightcone\\_lorentztransform.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/db/Minkowski_lightcone_lorentztransform.svg)
- [I] Wikipedia. *Minkowski-Diagramm mit eingezeichnetem Lichtkegel*.  
URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/37/Minkowski-Diagramm\\_-\\_Kausalit%C3%A4t.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/37/Minkowski-Diagramm_-_Kausalit%C3%A4t.svg)
- [J] freepik. *Schwarze Silhouette eines menschlichen Körpers*.  
URL: [https://image.freepik.com/freie-ikonen/menschlichen-korper-stehen-schwarze-silhouette\\_318-46903.png](https://image.freepik.com/freie-ikonen/menschlichen-korper-stehen-schwarze-silhouette_318-46903.png)
- [K] Nature. *Zelle*.  
URL: [http://www.nature.com/scitable/content/ne0000/ne0000/ne0000/ne0000/14704902/U1CP1-5\\_ProkvsEukCell\\_ksm.jpg](http://www.nature.com/scitable/content/ne0000/ne0000/ne0000/ne0000/14704902/U1CP1-5_ProkvsEukCell_ksm.jpg)
- [L] igoscience. *Aspirinmolekül*.  
URL: <http://igoscience.com/wp-content/uploads/aspirin-molecule-ball-stick-C9H8O4-v11.png>
- [M] Stupidedia. *Atom*.  
URL: <http://www.stupidedia.org/images/thumb/5/59/Atommodell.svg/180px-Atommodell.svg.png>

Sämtliche hier aufgeführten Abbildung wurden zuletzt am 08.08.2016 abgerufen.

Die Abbildungen 2 (a), 2 (b) und 4 (c) wurden mit Mathematica 10, die Abbildungen 8 (a), 8 (b), 8 (c) und 12 mit Dia 0.97.2 und die Abbildungen 7 und 10 mit Paint.NET erstellt.

---

---

## Danksagung

---

Zu aller erst möchte ich mich bei Frau Prof. Dr. Barbara Drossel für die Chance bedanken, mich bereits im Rahmen dieser Bachelorarbeit intensiv mit einem Problem zu beschäftigen, welches mich schon seit langem interessiert hat. Gleichzeitig möchte ich mich bei ihr bedanken, dass sie mir größtmöglichen Freiraum unter gleichzeitiger fruchtbarer Diskussion gegeben hat.

Weiterhin möchte ich mich bei meiner großen Liebe Bella für die liebevolle und inspirierende Unterstützung während der letzten Monate bedanken.

Ein weiterer Dank gebührt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern und meinem Bruder, für ihre jahrelange großartige Unterstützung seit meinen ersten Tagen.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Tante Dr. Angela Vogel für die finanzielle Unterstützung während meiner gesamten Studienzzeit bedanken.