

TEIL 3: CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER „DIE EINHEIT DER NATUR“
II.5 „Die Quantentheorie“
Abschnitte 1-3 ¹

Von Weizsäcker will in diesem Kapitel seine zentrale These aufbauen, dass die Struktur der Quantenmechanik mit der Struktur einer komplett vereinheitlichten Physik in weiten Teilen identisch ist:

[Die] Quantentheorie, wenn wir sie konsequent interpretieren, [ist] nicht nur ein allgemeiner Rahmen der Physik, sondern in gewissem Sinne schon die einheitliche Physik.²

In den ersten drei Abschnitten des Kapitels geht er dabei zunächst auf die Kopenhagener Deutung ein, erklärt dabei insbesondere das Verhältnis der Quantenmechanik zur klassischen Physik. Es soll gezeigt werden, warum Experimente in klassischen Begriffen beschrieben werden müssen.

Dann legt er eine „naives“ Verständnis einer Einheit der Physik vor und zeigt die Probleme dieses Verständnisses auf. Dabei entwickelt er schon in Ansätzen seine Vorstellung, dass

a) die Quantenmechanik in ihren Grundzügen schon mit der noch zu findenden vereinheitlichten Theorie identisch ist.

b) die zeitliche Struktur, d.h. die Unterscheidung von Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft eines der wesentlichsten Strukturmerkmale der vereinheitlichten Physik ist.

Im dritten Abschnitt schließlich geht von Weizsäcker ausführlich auf seine aus dem Erfahrungsbegriff („aus der Vergangenheit für die Zukunft lernen“) motivierte Zeitstruktur ein und führt sie in Form einer Logik zeitlicher Aussagen aus.

Abschnitt 1 – Die Kopenhagener Deutung

Ziel des Abschnitts ist es, einen auf Bohr zurückgehenden Satz zu erklären und zu beweisen, den v.W. für das „Zentrum der Kopenhagener Deutung“ hält:

Alle Experimente müssen in klassischen Begriffen beschrieben werden. (S.225, 23)

Es geht darum die anscheinende Paradoxie aufzulösen, dass die Quantenmechanik zwar die klassische Physik als „falsch“ ablöst, aber trotzdem selbst in ihrer empirischen Bestätigung genau auf diese klassische Physik angewiesen ist.

Das Argument ist durchaus komplex.

1. Nur was in Raum und Zeit beschrieben werden kann, kann überhaupt wahrgenommen werden. (228, 5)
2. Nur das Kausalprinzip erlaubt es, Schlüsse von wahrnehmbaren Eigenschaften auf nicht wahrnehmbare Eigenschaften vornehmen zu können, d.h. zu objektivieren (228, 6)
3. Objektivierbare Wahrnehmung setzt eine Beschreibung in Raum und Zeit sowie das Kausalprinzip voraus. (227, 34)

¹ Carl Friedrich von Weizsäcker, *Die Einheit der Natur*, DTV, München 2002, S.223 – 249

² S. 223

4. Ein Messinstrument muss objektivierbar wahrnehmbar sein.

5. **Soll ein physisches System als Meßinstrument brauchbar sein, muss es in Raum und Zeit unserer Anschauung beschrieben werden und dem Kausalprinzip genügen. (228, 2)**

6. Ein Vorgang, der spurlos vorübergeht, ist keine Messung. (230, 5)

7. In einem Messinstrument müssen irreversible Vorgänge ablaufen (230, 3)
8. Die Bedingung der Irreversibilität ist hinreichend (notwendig?), um eine klassische Annäherung zu definieren. (230, 11)
9. Messinstrumente sind "voll beobachtbare Objekte". (vgl. 4?)

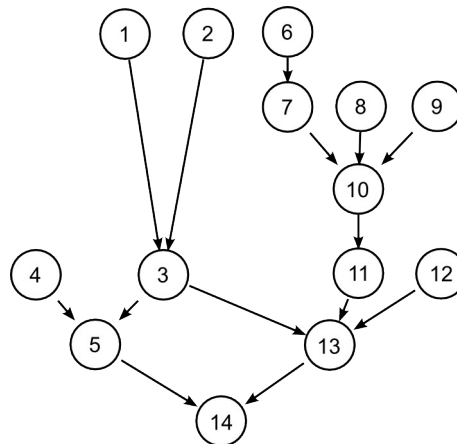
10. Die klassische Physik ist *genau* diejenige Annäherung der Quantentheorie, die auf Objekte passt, soweit sie voll beobachtbar sind. (230, 17)

11. Es gibt keine weitere Anpassung unseres Anschauungsvermögens (=objektivierbare Wahrnehmung?) an die Quantenmechanik als die klassische Physik. (230, 21)
12. Die Quantenmechanik geht über die Anschaulichkeit hinaus (228, 35)

13. **Raum-Zeitliche Beschreibung und Kausalität sind *nur* in der klassischen Physik vereinbar. (228, 10)**

14. **Alle Experimente müssen in klassischen Begriffen beschrieben werden. (225, 23)**

Die Struktur des Arguments ist dabei die folgende:



Diese Konklusion ist eng mit dem *Korrespondenzprinzip* verknüpft, welches besagt, dass die klassische Physik der Grenzfall der Quantenmechanik sein soll.

Hervorhebenswert ist auch die hier zum Ausdruck gebrachte Überzeugung, dass die Objekte der Physik nicht unbedingt direkt wahrnehmbar sind, sondern nur ihre Spuren (und dass diese Tatsache *notwendig*, d.h. aus transzendentalen Gründen, gilt.).

Interessant ist das Argument mit seinen Folgerungen vor allem dann, wenn sich tatsächlich transzendental aus dem Begriff der Wahrnehmung begründen lässt, dass *jede* Theorie im Grenzfall klassisch sein muss.

In der Diskussion hat das Argument jedoch noch einige Unklarheiten und Probleme gezeigt. Es ist ungeklärt, wie genau in Satz 5 die Begriffe „beschreiben“ und „kausal“ im Einzelnen zu verstehen sind. Es sollte davon abgesehen werden, die klassische *Beschreibbarkeit* mit dem vollständig klassischen *Verhalten* gleichzusetzen. „Kausal“ kann möglicherweise in der sehr einfachen Vorstellung ausgedrückt werden, dass das Verhältnis von Ursache und Wirkung zwischen den verschiedenen Bauteilen einer

Messapparatur bekannt sein muss. Zu klären ist dann aber, ob dieser Begriff nicht zu schwach gegenüber einem vollen Kausalitätsbegriff der klassischen Physik ist und inwiefern Satz 2 dann noch haltbar wäre.

In Satz 13 wirft der Begriff „klassisch“ noch erhebliche Fragen auf. Möglicherweise wäre es hilfreich, die „klassische Physik“ schlicht als die Physik zu *definieren*, die sich mit den uns unmittelbar zugänglichen Gegenständen und Erfahrungen beschäftigt. Damit wäre dann zumindest Satz 10 quasi per Definition richtig; die Problematik würde sich dann auf die Frage verlagern, inwiefern diese Definition mit dem Begriff der „klassischen Physik“, wie ihn der durchschnittliche Physiker ansetzen würde („Nicht-Quantenmechanik“?) in Einklang steht. Impliziert die Möglichkeit, Satz 10 zur Definition zu erklären nicht sogar, dass v.W. genau dieses möglicherweise unzureichendes Verständnis klassischer Physik annehmen muss?

Es muss hervorgehoben werden, dass v.W. an dieser Stelle mit dem Wort „nur“ aussagen möchte, dass nur in der klassischen Physik die Begriffe von Raum-Zeit und Kausalität vollständig konsistent benutzbar sind, ohne auszuschließen, dass sie in Einzelfällen nicht auch in der Beschreibung quantenphysikalischer Phänomene benutzt werden können.

Will man Satz 10 nicht per Definition richtig setzen, so dürfte eine besonders fragwürdige Prämisse zudem noch Satz 8 sein.

Im Anschluss an das Argument geht v.W. auf das *Prinzip der semantischen Konsistenz* ein:

*Die Regeln, denen gemäß wir unsere Messungen anstellen und beschreiben, und die so die Semantik des Formalismus festlegen, müssen mit den Gesetzen der Theorie vereinbar sein, d.h. mit den mathematischen Aussagen des Formalismus, so wie sie durch seine physikalische Semantik gedeutet sind.*³

Abschnitt 2 – Die Einheit der Physik. Erster Teil

V.W. stellt einen „naiven“ Vorschlag zu einer möglichen Einheit der Physik vor. Der vereinheitlichende Zusammenhang besteht in dem Satz „*Es gibt Objekte in Raum und Zeit*“ (S. 234, 16). Die verschiedenen grundlegenden Theorien der Physik lassen sich dann auffassen als Theorien über die verschiedenen Aspekte dieser Objekte⁴:

1. Eine Theorie der Raum-Zeit-Struktur (Relativitätstheorie)
2. Eine allgemeine Mechanik (Quantentheorie)
3. Eine Theorie der möglichen Arten von Objekten (Elementarteilchentheorie)
4. Eine Theorie der Irreversibilität (stat. Thermodynamik)
5. Eine Theorie der Gesamtheit der physischen Objekte (Kosmologie)

V.W. zeigt nun die Probleme dieser „Vereinheitlichung“ auf, zunächst in Bezug auf die verwendeten *Begriffe*:

- *Raum-Zeit-Struktur* spielt eine wichtige Rolle in allen 5 Kategorien, was einen Hinweis darauf gibt, dass sie der angesetzten Vereinheitlichung übergeordnet ist. (S. 234)
- Probleme des *Objekt*-Begriffs: „Objekt“ setzt einen Beobachter voraus; wie kann dieser selbst auch „Objekt“ sein? Wie ist der Objektbegriff zu verstehen, wenn es laut der QM keine echt isolierten Objekte gibt? (S. 235)

³ S. 231

⁴ Vgl. S. 233-234

Des weiteren werden eine ganze Reihe von Problemen in Bezug auf das *Verhältnis* der 5 Theorien aufgezeigt. Einige von v.W.'s Ausführungen sind dabei recht technisch und nur schwer nachvollziehbar. Von besonderer Wichtigkeit sind aber zwei Bemerkungen; sie weisen den Weg zu v.W.'s nachfolgendem Programm.

- Es ist „empirisch sinnlos“, *allgemeine* Gesetze der QM anzunehmen, wenn die Elementarteilchentheorie deren Allgemeinheit dann einschränkt (S. 236)
Daraus lässt sich nach v.W. erwarten, dass sich die QM letztendlich als äquivalent zur Elementarteilchentheorie herausstellen wird. Dies würde schon darauf hinweisen, dass die QM selbst schon in Ansätzen die vereinheitlichte Theorie (s.u.) ist.
- Die Frage, ob Irreversibilität elementar ist oder nicht, führt auf die Erkenntnis der Irreversibilität als *Zeitstruktur* (Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft müssen unterschieden werden; S. 238 f.).

Das Argument ist in etwa das folgende:

1. Das H-Theorem sagt aus, dass ein System welches zum Zeitpunkt t_0 eine bestimmte Entropie besitzt, mit großer Wahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt $t > t_0$ eine höhere Entropie besitzt. (238, 2)
2. Die Betrachtungen bei der Herleitung des H-Theorems sind mikroskopisch reversibel. (238, 8)

3. Wenn sich der Begriff der Wahrscheinlichkeit auch auf die Vergangenheit anwenden lässt, dann muss das H-Theorem auch für Zeitpunkte $t < t_0$ gelten. (238, 8)
4. Nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik gilt das H-Theorem *nicht* für Zeitpunkte $t < t_0$. (238, 13)

5. Der Begriff der (objektiven) Wahrscheinlichkeit lässt sich nicht auf die Vergangenheit anwenden (238, 15)

6. Vergangenheit, Gegenwart, und Zukunft sind eine Grundstruktur der Zeit

Zweifelhaft ist an dieser Stelle die Prämisse 3. Möglicherweise könnte es auch andere Lösungen des Paradoxons geben.⁵

Zu diskutieren wäre zudem, inwiefern genau v.W.'s Einführung der Zeitstruktur das von ihm diskutierte Paradoxon der Boltzmannschen Schwankungstheorie umgeht.

Konsequenz der Betrachtungen ist die folgende Vermutung:

*[Es besteht] eine ursprüngliche Einheit jenseits der heute bekannten Teile der fünf Theorien.*⁶

Ziel wird es sein, herauszufinden, was die Grundpostulate der vereinheitlichten („abgeschlossenen“) Theorie sind (S. 240, 15) und wie sich diese Fundamentaltheorie begründen lässt (S. 240, 29).

Abschnitt 3 – Logik zeitlicher Aussagen

Dieser Abschnitt untersucht, welche Folgerungen sich aus dem Verständnis der Physik als *Erfahrungswissenschaft*, bzw. sich der daraus ableitbaren Zeitlichkeit der Physik, ergeben:

⁵ siehe http://en.wikipedia.org/wiki/Loschmidt%27s_paradox

⁶ S. 240, 9

Ich werde versuchen, herauszufinden, wieviel schon aus dem Postulat folgt, daß sich Physik, um Erfahrungswissenschaft sein zu können, auf die Zeit beziehen muss.⁷

V.W. gelingt es dabei zu zeigen, dass sich mindestens die *Quantenlogik*, und damit schon ein wesentlicher Teil der Quantenmechanik aus dem Erfahrungsbegriff herleiten lässt.

1. Erfahrung heißt, von der Vergangenheit für die Zukunft lernen. (241, 25)
2. Physik ist Erfahrungswissenschaft. (242, 8)

3. Physik bezieht sich wesentlich auf die Zeit. (242, 9)
4. Vergangenheit, Gegenwart, und Zukunft sind eine Grundstruktur der Zeit. (247, 23)

5. Die Grundstruktur von Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft findet sich in der Physik wieder.
6. In Bezug auf die Grundstruktur der Zeit lässt sich eine Logik zeitlicher Aussagen entwickeln

7. Die Logik zeitlicher Aussagen lässt sich in die Physik übertragen.
8. Die Quantenlogik ist eine Spezialform der Logik zeitlicher Aussagen. (243, 31)
9. Die Quantenlogik gibt eine wesentliche Struktur der Quantenmechanik wieder. (242, 25)

10. Die Logik zeitlicher Aussagen und damit letztendlich der Erfahrungsbegriff wird in einer wesentlichen Struktur der Quantenmechanik wiedergespiegelt.

Der Großteil des Abschnitts beschäftigt sich mit dem Entwickeln der Logik zeitlicher Aussagen bzw. der Quantenlogik. Das wesentliche Ergebnis ist, dass die Begriffe „wahr“ und „falsch“ nur auf die Vergangenheit und Gegenwart angewandt werden können, für Zukunftsaussagen allerdings eine Modallogik angewandt werden muss. Die Quantenlogik spezifiziert die Modallogik durch Wahrscheinlichkeiten.

Eine Skizze der Betrachtungen zur Logik zeitlicher Aussagen:

V.W. analysiert die Gültigkeit logischer Regeln mithilfe einer „Metalogik“, die er in Form eines „Spiels“ ansetzt: Eine logische Formel ist dann wahr, wenn ein Opponent für die in der Formel vorkommenden Symbole konkrete Aussagen einsetzt, und der Proponent garantieren kann, dass er für jede Einsetzung den konkreten Satz beweisen kann.⁸

Damit lässt sich feststellen, dass für zeitliche, „kontingente“⁹, Aussagen, bestimmte Gesetze der klassischen Logik nicht mehr bewiesen werden können. Unmittelbar sind nur Beweise für die Aussagen der *Gegenwart* (was äquivalent ist mit zeitlosen Aussagen) möglich. Für die *Vergangenheit* lässt sich das Problem der Zeitlichkeit umgehen, indem man *Dokumente* heranzieht, die in der Gegenwart unmittelbar zugänglich sind. Für die Zukunft ist das Heranziehen von Dokumenten nicht möglich, daher können die Begriffe „wahr“ und „falsch“ nicht verwendet werden, sondern nur die Begriffe der Modallogik „notwendig“, „möglich“ und „unmöglich“.

⁷ S. 242, 7

⁸ Dies scheint im wesentlichen identisch zu sein mit dem Verfahren der *Interpretation* logischer Formeln, siehe U. Nortmann, *Sprache, Logik, Mathematik*, mentis, Paderborn 2003, Kapitel 3

⁹ Unter kontingenten Aussagen versteht v.W. solche Aussagen, die zum jetzigen Zeitpunkt wahr, aber zu einem späteren Zeitpunkt falsch sein können.

Eine Skizze der Betrachtungen zur Quantenlogik:

Die Quantenlogik lässt sich unmittelbar aus der Quantenmechanik ableiten, indem man die Eigenwerte 0 und 1 von Projektionsoperatoren mit den logischen Begriffen „falsch“ und „wahr“ identifiziert. Für Nicht-Eigenzustände des Operators ergeben sich dann Mischzustände, die als Wahrscheinlichkeiten interpretiert werden. Die Quantenlogik ist damit nicht-boolesch.

Damit ist die Quantenlogik eine „quantitative“ Verfeinerung der allgemeinen Logik zeitlicher Aussagen.

Auch wenn sich die Quantenlogik aus der Quantenmechanik ableiten lässt, so entstammt sie doch gemäß dem Argument der letzten Seite eigentlich einer „Vorbedingung aller Erfahrung“ (S. 243, 32), nämlich der Zeitstruktur..

Zur genauen Interpretation des Wahrscheinlichkeitsbegriffs äußert sich v.W. dahingehend, dass die subjektivistische Wahrscheinlichkeitsinterpretation aus der Sicht der Physiker unbefriedigend ist, und dass stattdessen die Interpretation als „Erwartungswert einer relativen Häufigkeit“ (S. 249, 20) herangezogen werden sollte.