Humboldt-Universität zu Berlin
Institut für Philosophie
Proseminar Konservativität bei der Theorienwahl
Leitung: Prof. Dr. Olaf Müller
Modul: Wahlfrei
Sommersemester 2015

Volumenverdopplung – ein Beispiel für Unterbestimmtheit von Theorien durch Daten?

11. November 2015

Moritz Höppner
E-Mail: m-hoeppner@gmx.net
Matrikelnummer: 546523

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

In seinem Aufsatz *On Empirically Equivalent Systems of the World* formuliert Quine die These, dass empirische Daten wissenschaftliche Theorien nicht eindeutig bestimmen. Deshalb gebe es zu einer gegebenen Theorie immer eine empirisch äquivalente Alternativtheorie, sodass beide logisch inkompatibel sind und durch eine bestimmte Art der Änderung von Prädikaten niemals logisch äquivalent werden können:

> „[U]nder-determination says that for any one theory formulation there is another that is empirically equivalent to it but logically incompatible with it, and cannot be rendered logically equivalent to it by any reconstrual of predicates.“[1]

Quine spricht hier nicht von Theorien, sondern von *theory formulations*. Er versteht darunter eine Art Axiomensystem, wobei es sich bei ihm stets um eine endliche Anzahl von Axiomen handelt und er somit eine *theory formulation* als Satz, nämlich als Konjunktion aller Axiome auffassen kann.[2] Eine Theorie ist für Quine eine Äquivalenzklasse solcher *theory formulations* bezüglich einer bestimmten Relation. Da aber in der oben zitierten Formulierung der These von Theorien gar nicht die Rede ist, kann der begriffliche Aufwand in dieser Arbeit reduziert werden, indem Theorien wie sonst üblich als Satzmengen aufgefasst werden, nämlich als deduktive Hüllen von Quines *theory formulations*.

In seinem Aufsatz bleibt Quine dem Leser ein Beispiel für eine solche Unterbestimmtheit schuldig. Ich möchte hier einen Ansatz untersuchen, empirisch äquivalente Alternativtheorien zur gegenwärtigen physikalischen Theorie zu bilden, nämlich solche Theorien, die einen Satz enthalten, der besagt: Das Volumen jedes Körpers im Universum verdoppelt sich alle 24 Stunden. Diese Aussage nenne ich „Verdopplungsthese“.

Nachdem ich zuvor Theorien als logische Konsquenzen einer Axiomenmenge erklärt habe, ist es fragwürdig, von „der gegenwärtigen physikalischen Theorie“ zu sprechen, denn erstens gibt es nicht *die* Physik, sondern mehrere Theorien, die zum Teil einander widersprechen, zum Teil auch unterschiedliche Gegenstandsbereiche haben; zweitens gibt es von keinem dieser Bestandteile der Physik eine allgemein anerkannte formale Ausarbeitung. Das Problem der Uneinheitlichkeit werde ich umgehen, indem ich mich nur auf einen kleinen, konsistenten Teil der Physik beziehe, nämlich auf die klassische Mechanik, die ich kurz „Mechanik“ oder „M“ nennen werde. Auch ihre Sätze werden aber üblicherweise nicht in einer formalen Fassung angegeben, sodass man versucht sein könnte, den Theoriebegriff auf natürlichsprachliche Satzmengen auszudehnen. Dagegen spricht jedoch, dass Quine selbst einige Begriffe auf Theorien und ihre Sätze

[1] Quine, Willard Van Orman: On Empirically Equivalent Systems of the World. In: Erkenntnis 9 (1975), S. 313-328. Hier: S. 322.
[2] Vgl. Quine, S. 318.

anwendet, die in Bezug auf natürlichsprachliche Satzmengen mindestens unklar, gelegentlich sogar sinnlos sind. Das deutlichste Beispiel hierfür ist wohl der Begriff „reconstrual of predicates“, den ich oben vage mit dem Ausdruck „eine bestimmte Art der Änderung von Prädikaten“ erläutert habe. Dass eine Änderung der Prädikate der einzige Transformationsmechanismus ist, den Quine berücksichtigt, lässt bereits ahnen: Er setzt eine rein prädikatenlogische Formulierung der Theorien voraus. Möchte man Quines Überlegungen auf naturwissenschaftliche Theorien anwenden, müssen diese also zuvor in eine formale Sprache übersetzt werden. Bis zu einem gewissen Grad werde ich das tun und mich damit zwangsläufig dem Vorwurf aussetzen, die Ergebnisse dieser Arbeit seien Folgen einer zum Teil willkürlichen Übersetzung und somit arbiträr. Ich nehme das in Kauf, da ich erstens keinen anderen Weg sehe, zweitens aber hoffe, zumindest plausibilisieren können, dass eine gewisse Willkür bei der Übersetzung nicht der entscheidende Grund für meine Ergebnisse ist.

Wenn ich nun Theorien entwerfe, die die Verdopplungsthese enthalten, müssen diese folgende Anforderungen erfüllen, um als Beispiel für die Unterbestimmtheitsthese gelten zu können: Erstens müssen sie zur Mechanik empirisch äquivalent sein. Da ich keine völlig neuartige Physik erfinden kann, muss jede Alternativtheorie mit M zumindest verwandt sein, um dieses Kriterium erfüllen zu können. Zweitens müssen die Alternativtheorie und M logisch inkompatibel sein, was ich so verstehe: Ihre Vereinigung enthält einen Widerspruch. Drittens darf die Alternativtheorie durch ein *reconstrual of predicates* nicht logisch äquivalent zu M werden – an geeigneter Stelle werde ich genauer erläutern, was hiermit gemeint ist.

Ich möchte zwei Versuche unternehmen, eine solche Theorie zu entwickeln. Der erste besteht darin, die Mechanik um die Verdopplungsthese zu erweitern. Dass sich damit die gegebenen Anforderungen nicht erfüllen lassen, liegt auf der Hand: Logische Inkompatibilität ist nicht gegeben. Der Grund, aus dem ich diesen Weg dennoch zuerst beschreite, vor allem dieser: Es ist zunächst unklar, wie man die Verdopplungsthese als Satz einer physikalischen Theorie formulieren soll, vielleicht sogar, wie sie zu verstehen ist. Ich werde mich dieser Frage anhand der Diskussion eines Arguments nähern, mit dem behauptet werde könnte, die Mechanik schließe die Verdopplungsthese aus, die Erweiterung sei also inkonsistent. Die Frage, ob das tatsächlich der Fall ist, ist schon an sich interessant. Deshalb werde ich das Argument gegen die Vereinbarkeit ausführlicher diskutieren, als es nötig wäre, nur um eine angemessene Formulierung der Volumenverdopplung zu erarbeiten.

In einem zweiten Schritt sollen die gewonnenen Erkenntnisse genutzt werden, um eine potentiell geeignete Beispieltheorie zu entwickeln. Dabei kann nicht einfach die Mechanik übernommen werden, sondern es müssen Modifikationen an ihr vorgenommen werden. Da dies mit erheblichem Aufwand verbunden ist, werde ich nur ein sehr kleines Fragment der klassischen Mechanik betrachten, an ihm aber deutlich machen, wie die Alternativtheorie konstruiert werden kann. Ich gestehe bereits an dieser Stelle: Der Versuch wird fehlschlagen, wird kein Beispiel für Quines Behauptung liefern. Trotzdem kann man an ihm etwas über die Unterbestimmtheitsthese lernen – das möchte ich im letzten Abschnitt dieser Arbeit versuchen.

2 Erweiterung der Mechanik

Zunächst möchte ich M lediglich um die Verdopplungsthese erweitern; die so entstehende Theorie bezeichne ich mit „M^+“. Sie ist kein Beispiel für Unterbestimmtheit in Quines Sinne, denn entweder ist sie inkonsistent, oder M^+ und M sind logisch kompatibel – schließlich ist M eine Teiltheorie von M^+, somit ist die Vereinigung beider M^+ selbst. Dass beide Theorien logisch inkompatibel sind, ist also genau dann wahr, wenn M^+ inkonsistent ist. Auch in diesem Fall wäre dennoch kein Beispiel konstruiert, denn sicher bezieht Quine seine Überlegungen nicht auf inkonsistente Theorien: Jede inkonsistente Theorie ist auch ω-inkonsistent und Quine schreibt explizit, dass er ω-inkonsistente Theorien nicht berücksichtigen möchte.[3]

M^+ ist eine Menge naturwissenschaftlicher Sätze, die nicht einmal ansatzweise formalisiert sind (ich spreche trotzdem der Kürze halber von einer Theorie). Konsistenz soll hier entsprechend nicht formal-syntaktisch verstanden werden; dass eine Satzmenge konsistent ist, soll lediglich bedeuten, dass sie keine zwei Sätze enthält, die nicht zugleich wahr sein können. Es scheint ein Argument für die Inkonsistenz von M^+ in diesem Sinne zu geben, das ich zunächst darstellen möchte.

2.1 Schließt die Mechanik die Verdopplungsthese aus?

Ich beschreibe nun den idealen Versuchsaufbau eines Experiments, für dessen Ergebnis M^+ Verschiedenes vorherzusagen scheint, je nachdem, ob die Verdopplungsthese bei der Herleitung der Vorhersage eingeht oder nicht. Angenommen, zwei gleich große, einander berührende Kugelschalen mit Radius r befinden sich in einem kräftefreien Raum, zum Zeitpunkt Null erfahren beide keine Beschleunigung. In ihrem Inneren befinden sich Kraftmesser, die beide in kurzen Zeitabständen die Beschleunigung des jeweiligen Geräts an einen Beobachter übermitteln. Laut Standardphysik wird der Beobachter zu keinem Zeitpunkt einen Ausschlag des Kraftmessers feststellen können, da die Kugeln zu Beginn des Experiments nicht beschleunigt sind und im Raum keine äußeren Kräfte wirken. Unter Annahme der Verdopplungsthese scheint sich aber eine andere Vorhersage zu ergeben.

Der Mittelpunkt einer der beiden Kugeln sei nun als der Nullpunkt eines kartesischen

[3] Vgl. Quine, S. 323.

Koordinatensystems gesetzt – da dieser Nullpunkt gemäß den eben geschilderten Annahmen nicht beschleunigt, handelt es sich hierbei um ein Inertialsystem. Beide Kugeln berühren sich, bezeichnet also $d(t)$ den Abstand der Mittelpunkte beider Geräte zum Zeitpunkt t, so gilt $d(0) = 2r$. Da keine äußeren Kräfte wirken, werden sich die Kugeln im Laufe der Zeit stets berühren, der Abstand ihrer Schalen bleibt immer Null.

Gilt nun aber die Verdopplungsthese, muss sich das Volumen beider nach 24 Stunden verdoppelt haben. Der Radius r_{24} nach 24 Stunden erfüllt also die Gleichung

$$\frac{4}{3}\pi(r_{24})^3 = 2 \cdot \frac{4}{3}\pi r^3,$$

somit gilt $r_{24} = \sqrt[3]{2} \cdot r$. Entsprechend beträgt ihr Radius r_{48} nach 48 Stunden $r_{48} = \sqrt[3]{2} \cdot r_{24} = \sqrt[3]{2}\sqrt[3]{2} \cdot r = \sqrt[3]{4} \cdot r$. Insgesamt gilt für eine natürliche Zahl n stets

$$d(n \cdot 24\text{h}) = 2r \cdot \sqrt[3]{2^n}.$$

Was bedeutet das für die Mittelpunkte der Kugeln? Jedenfalls müssen sie sich voneinander wegbewegen und hier wird das vermeintliche Problem liegen: Eine beschleunigte Bewegung müsste eine Kraft verursachen, also einen Ausschlag des Messgeräts. Eine Hoffnung könnte sein, dass sich die Kugeln gleichförmig bewegen, das kann jedoch mathematisch ausgeschlossen werden: Wenn sich die Mittelpunkte linear bewegen, dann wächst auch ihr Abstand nur linear; wir haben aber bereits festgestellt, dass der Abstand – zumindest in 24-Stunden-Schritten – exponentiell wächst. Es ist allerdings nicht klar, ob die Verdopplungsthese eine Aussage darüber zulässt, was für den Abstand innerhalb dieser 24-Stunden-Intervalle gilt. Es könnte sein, dass sie so zu lesen ist: Unabhängig davon, zu welchem Zeitpunkt man das Volumen eines Körpers betrachtet – 24 Stunden später hat es sich verdoppelt. Diese Lesart ergäbe eine kontinuierliche Beschreibung des Abstands, nämlich

$$d(t) = 2r \cdot \sqrt[3]{2^{\frac{t}{24\text{h}}}}.$$

Diese Interpretation ist allerdings für die Zwecke des Arguments unnötig, die diskrete Beschreibung genügt, sofern man annimmt, dass d zweimal differenzierbar ist. Der Mittelwertsatz der Differentialrechnung liefert nämlich folgendes Ergebnis: Zwischen den Zeitpunkten $n \cdot 24\text{h}$ und $(n + 1) \cdot 24\text{h}$ gibt es einen Zeitpunkt t_n, zu dem die Änderung des Abstands seiner durchschnittlichen Änderung im betrachteten Intervall entspricht. Also:

$$\begin{aligned} d'(t_n) &= \frac{2r \cdot \sqrt[3]{2^{n+1}} - 2r \cdot \sqrt[3]{2^n}}{(n+1) \cdot 24\text{h} - n \cdot 24\text{h}} \\ &= \frac{1}{12\text{h}} \cdot r \cdot \left(\sqrt[3]{2^{n+1}} - \sqrt[3]{2^n}\right) \\ &= \frac{1}{12\text{h}} \cdot r \cdot \left(\sqrt[3]{2} - 1\right) \cdot \sqrt[3]{2^n} \end{aligned}$$

Nicht nur der Abstand selbst, sondern auch seine Änderung wächst also von einem 24-Stunden-Intervall zum nächsten exponentiell. Das gleiche Verfahren kann nun auf d' angewendet werden. In jedem Intervall $[t_n, t_{n+1}]$ gibt es nach dem Mittelwertsatz einen Zeitpunkt t'_n, zu dem gilt

$$\begin{aligned} d''(t'_n) &= \frac{\frac{1}{12\mathrm{h}} \cdot r \cdot \left(\sqrt[3]{2} - 1\right) \cdot \sqrt[3]{2^{n+1}} - \frac{1}{12\mathrm{h}} \cdot r \cdot \left(\sqrt[3]{2} - 1\right) \cdot \sqrt[3]{2^n}}{t_{n+1} - t_n} \\ &= \frac{\frac{1}{12\mathrm{h}} \cdot r \cdot \left(\sqrt[3]{2} - 1\right)^2 \cdot \sqrt[3]{2^n}}{t_{n+1} - t_n}. \end{aligned}$$

Nun sind t_n und t_{n+1} Zeitpunkte aus aufeinander folgenden 24 Stunden-Invervallen, somit ist ihre Differenz nicht größer als 48 Stunden und es gilt

$$d''(t'_n) \geq \frac{1}{12\mathrm{h} \cdot 48\mathrm{h}} \cdot r \cdot \left(\sqrt[3]{2} - 1\right)^2 \cdot \sqrt[3]{2^n}.$$

Relativ zum Koordinatensystem, in dessen Nullpunkt sich eine der Kugeln befindet, ist die Abstandsfunktion d gleichzeitig die Ortsfunktion der anderen Kugel. Und da es sich bei diesem Koordinatensystem um ein Inertialsystem im Raum ohne äußere Kräfte handelt, wirkt auf diese Kugel mit Ortsfunktion d eine zu d'' proportionale Kraft. Was auch immer ein Beobachter der Daten des Kraftmessers genau sähe, jedenfalls müsste er immer wieder Zeitpunkte finden, zu denen eine Kraft auf die Kugel wirkt. Mehr noch, je länger er beobachtet, desto größer würde diese Kraft: Immer wieder läge ihr Wert oberhalb von oder genau auf einer exponentiell ansteigenden Kurve.

2.2 Kritik des Arguments – Was bedeutet die Verdopplungsthese?

Fragwürdig an der geschilderten Argumentation ist die Aussage, dass sich nach 24 Stunden das Volumen der Kugeln verdoppelt und somit der Radius um den Faktor $\sqrt[3]{2}$ ändert. Einerseits scheint es sich dabei um eine direkte Konsequenz aus der Verdopplungsthese zu handeln, andererseits möchte man einwenden: Wer das Volumen misst, wird nicht feststellen können, dass sich ihr Volumen verdoppelt hat, denn es vergrößert sich auch jeder Maßstab im Universum.

Eine Auflösung dieser Verwirrung ergibt sich durch das Einsetzen konkreter Werte für r. Angenommen, die Kugeln haben zu Beginn des Experiments einen Radius von einem Meter. Dann haben Sie 24 Stunden später nicht einen Radius von $\sqrt[3]{2}\,\mathrm{m}$, sondern noch immer von einem Meter, denn jedes Maßband ändert seine Größe ja ebenfalls. Allerdings: Wenn die Verdopplungsthese wahr ist, ändert sich die Bedeutung des Terms „ein Meter“. Das ergibt sich durch die Annahme, ein Meter sei die Strecke, die auf einem Maßband gekennzeichnet ist, ergibt sich durch die alte Meterdefinition als Länge des Urmeters, ergibt sich aber auch aus seiner modernen Definition als der Strecke, die das Licht im Vakuum innerhalb einer bestimmen Zeitspanne zurücklegt: Für uns Bewohner des Universums erscheint die Lichtgeschwindigkeit konstant. Aus der Verdopplungsthese folgt aber, dass alle Strecken mit der Zeit länger werden. Also muss die Lichtgeschwindigkeit, relativ zu einem absoluten Maßstab, ebenfalls größer werden.

Die Verdopplungsthese scheint also eigentlich eine semantische Festlegung zu sein. Das widerspricht nicht der Tatsache, dass die Meterdefinition Bestandteil der Theorie ist: Der Satz „Ein Meter ist die Strecke, die Licht in soundsoviel Sekunden im Vakuum zurücklegt." ist formal betrachtet ein Axiom, das lediglich die Verwendung der in ihm vorkommenden Ausdrücke festlegt. Wenn sich die Interpretation eines dieser Ausdrücke ändert, muss sich womöglich auch die anderer Ausdrücke ändern, damit das Axiom nach wie vor erfüllt sein kann. In diesem Fall muss klarerweise der Funktionsausdruck „die Strecke, die Licht usw." seine Bedeutung ändern – sie wird, ebenso wie die des Meters, zeitabhängig. Gleiches gilt für die Definition anhand des Urmeters, hier noch offensichtlicher: Der Wert des Ausdrucks „Länge des Urmeters" ändert sich mit der Zeit, wenn die Verdopplungsthese gilt. Um die Verdopplungsthese aber als Satz der Theorie zu formulieren, ist ein zeitlich unveränderliches Streckenmaß nötig. Also muss eine neue Einheit mit explizit zeitlich fixiertem Wert erklärt werden. Zum Beispiel:

> 1 w ist die Länge des Urmeters am 1. Januar 1900 um 9 Uhr.

(Ich verwende hier die Urmeterdefinition einerseits aus Einfachheitsgründen, andererseits, weil sie sich in eine Theorie der Mechanik besser einfügt als eine Definition, die auf die Lichtgeschwindigkeit zurückgreift.) Damit noch einmal zurück zum Argument gegen die Konsistenz von M^+: Damit die Annahme der Vergrößerung mit der Zeit gerechtfertigt ist, muss r in dieser neuen Einheit w gegeben werden. Dann hat allerdings die Beschleunigung d'' die Einheit w/s^2 – der Kraftmesser im Inneren der Kugel gibt aber Kräfte in Newton an, also in $\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}/\mathrm{s}^2$. Ein Vertreter des obigen Arguments müsste also in der Lage sein, es auch mit Größen in SI-Einheiten durchzuführen; zuletzt möchte ich das versuchen.

Die beiden Streckeneinheiten verhalten sich ähnlich wie die Radien im Argument: Zum Zeitpunkt Null (also dem 1. Januar 1900 um 9 Uhr) bezeichnen „1 w" und „1 m" dieselbe Strecke. 24 Stunden später entspricht 1 w aber nur noch $1\,\mathrm{m}/\sqrt[3]{2}$, nach 48 Stunden $1\,\mathrm{m}/\sqrt[3]{2^2}$ und so weiter. Das ergibt sich aus der Überlegung, dass das in Kubikmetern gemessene Volumen einer Kugel über die Zeit konstant bleiben muss. Allgemein bezeichnen zum Zeitpunkt $n \cdot 24\,\mathrm{h}$ die Ausdrücke „1 w" und „$1\,\mathrm{m}/\sqrt[3]{2^n}$" dieselbe Strecke. Laut Verdopplungsthese verdoppeln sich alle 24 Stunden die Radien der Kugeln, sofern man sie in w misst. Die Beobachtung über den Abstand d, nämlich

$$d(n \cdot 24\,\mathrm{h}) = 2r \cdot \sqrt[3]{2^n}$$

gilt also für einen in w angegebenen Radius r. Gemäß den obigen Überlegungen zum

Verhältnis der Einheiten m und w gilt für den „empirischen", d. h. in Metern gemessenen, Abstand $\bar{d}$:

$$\bar{d}(n \cdot 24\mathrm{h}) = \frac{d(n \cdot 24\mathrm{h})}{\sqrt[3]{2^n}} \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{w}} = 2r \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{w}}$$

Der in Metern gegebene Abstand der Kugeln ist offenbar zeitunabhängig, das Argument gegen die Konsistenz von M^+ funktioniert also nicht. Mit der neuen Einheit ist nun auch klar, wie man die Verdopplungsthese ausdrücken kann:

> $n \cdot 24$ Stunden nach dem 1. Januar 1900 um 9 Uhr entspricht ein Meter der Strecke $\sqrt[3]{2^n}$ w.

Außer diesem Satz und der Definition der neuen Einheit soll M^+ also alle Sätze aus M enthalten. Und wie schon gesagt: Diese bloße Erweiterung liefert keine logisch inkompatible Theorie, kann also nicht als Beispiel für Unterbestimmtheit dienen. Deshalb werde ich im folgenden Abschnitt einen neuen Versuch unternehmen, in dem mehr als eine Erweiterung der vorhandenen Theorie geschehen wird.

3 Modifikation der Mechanik

Obwohl es unnütz ist, M schlicht zu erweitern, muss ich auch zur Konstruktion der neuen Alternativtheorie, genannt „$\widetilde{M}$", zu einem gewissen Grad auf die vorhandene Physik zurückgreifen. Und es genügt nicht, eine bloß oberflächliche Modifikation der Sätze von M vorzunehmen, etwa Bezeichnungen zu tauschen; die Änderung muss möglichst tiefgreifend sein, um die Chance zu erhöhen, dass kein *reconstrual of predicates* gefunden werden werden kann, durch das $\widetilde{M}$ zu M äquivalent würde. Da ich am Ende Rechenschaft darüber werde ablegen müssen, ob $\widetilde{M}$ dieser Anforderung gerechnet wird, möchte ich zunächst genauer erklären, was Quine mit „reconstrual of predicates" meint. Er schreibt:

> „By a *reconstrual* of the predicates of our language, accordingly, let me mean any mapping of our lexicon of predicates into our open sentences (n-place predicates to n-variable sentences)."[4]

Ich werde den so erklärten Begriff fortan mit dem deutschen Ausdruck „Umdeutung der Prädikate" bezeichnen. Aus Quines Erklärung geht nicht explizit hervor, wie sich Theorien durch eine Umdeutung der Prädikate ändern. Deshalb möchte ich einen weiteren Begriff einführen, nämlich „Umdeutung der Sätze":

> Sei φ ein Satz einer prädikatenlogischen Sprache, F eine Umdeutung der Prädikate. D. h. für ein n-stelliges Prädikat P ist $F(P)$ eine Formel der Sprache mit genau n freien Variablen $x_1, \ldots, x_n$.

[4]Quine, S. 320

Eine *Umdeutung der Sätze* ist eine Abbildung U von Sätzen der Sprache, sodass $U(\varphi)$ dadurch aus φ entsteht, dass für jedes n-stellige Prädikat P jedes Vorkommen von $Pt_1 \dots t_n$ mit Termen $t_1, \dots, t_n$ durch $F(P)$ ersetzt wird, wobei in $F(P)$ x_1 durch t_1 ersetzt wird, x_2 durch t_2 und so weiter.

Für eine Satzmenge T soll T^U die Menge der umgedeuteten Sätze bezeichnen:

$$T^U := \{U(\varphi) \mid \varphi \in T\}.$$

Die Aufgabe ist nun also, eine zu M empirisch äquivalente Theorie $\widetilde{M}$ zu finden, sodass für keine Umdeutung der Sätze U gilt, dass $\widetilde{M}^U$ und M äquivalent sind (da es sich um deduktiv abgeschlossene Mengen handelt, genügt es sogar zu sagen: $\widetilde{M}^U$ und M dürfen nicht gleich sein). Eine Chance, das zu beurteilen hat man nur, wenn $\widetilde{M}$ und M formale Theorien sind, oder zumindest ihre Sätze in einer Formulierung gegeben sind, aus der ihre logische Struktur hervorgeht. Wie eine solche Formalisierung angemessen geschehen kann, ist natürlich schon für sich ein umfangreiches Problem, deshalb werde ich $\widetilde{M}$ und M stets nur fragmentarisch beschreiben, in der Hoffnung, dass die so dargestellten Prinzipien sich auch auf die übrigen Teile der Theorien anwenden lassen. Insobesondere werde ich stets eindimensionale Anordnungen betrachten, ohne jeweils ausdrücklich darauf hinzuweisen – dies vereinfacht die Notation, stellt aber keine nennenswerte Einschränkung dar, denn durch Verwendung vektorwertiger Ortsfunktionen lassen sich alle Überlegungen auf höherdimensionale Systeme übertragen.

3.1 Eine Beschreibung der neuen Theorie

Es wäre ein unnötiger Aufwand, die Sätze von $\widetilde{M}$ so anzugeben, dass physikalische Größen durch Werte in verschiedenen Einheiten bestimmt werden können. Deshalb sollen Größen von nun an reine Zahlen als Werte haben und Einheiten nur noch im informellen Kontext verwendet werden. Im vorigen Abschnitt hatte ich zwei Streckeneinheiten verwendet, m und w – die intendierte Lesart einer Streckenangabe ergibt sich nun stets daraus, über welche Theorie ich spreche: Im Zusammenhang mit $\widetilde{M}$ sollen Streckenlängen als Größen in w interpretiert werden, sonst als Größen in Metern. Die bisherigen Überlegungen lassen es weiterhin zweckmäßig erscheinen, dass Zeitintervalle grundsätzlich in Stunden angegeben werden.

Der Term „$\sqrt[3]{2^{\frac{t}{24}}}$“ wird in den folgenden Rechnungen immer wieder erscheinen, deshalb möchte ich für ihn eine Kurzschreibweise einführen:

$$\mu(t) := \sqrt[3]{2^{\frac{t}{24}}} = 2^{\frac{t}{72}}$$

Beim zeitlichen Ableiten erhält diese Funktionen einen konstanten Faktor, den ich mit

α bezeichne:

$$\frac{d}{dt}\mu = \frac{\log 2}{72} \cdot \mu =: \alpha \cdot \mu$$

Damit also zur Beschreibung der Theorie $\widetilde{M}$. Verdopplungsthese und Definition der neuen Einheit können informell nun so beschrieben werden:

> Sind nach dem 1. Januar 1900 um 9 Uhr t Stunden verstrichen, so beträgt die Länge des Urmeters $\mu(t)$ w.

Hier bin ich von der allgemeineren, diskreten Interpretation der Verdopplungsthese zur kontinuierlichen übergegangen, da diese bei den folgenden Rechnungen einfacher in der Handhabung ist. Wie angekündigt möchte ich nun die logische Struktur dieses Satzes explizieren. Um das Gesetz $F = ma$ in die Theorie aufzunehmen, muss ihre Sprache jedenfalls ein Prädikat enthalten, mit dem ausgesagt wird, dass etwas die Ortsfunktion von einem physikalischen Objekt ist, um durch diese Ortsfunktion seine Beschleunigung zu erklären. Sind Ortsfunktionen gegeben, können Längen als Differenzen von Orten ausgedrückt werden, sodass kein Prädikat „ist Länge von" benötigt wird. „Urmeter" bzw. Bezeichnungen für seine beiden Enden sind singuläre Termini und können, falls die Sprache keine singulären Termini enthalten soll, durch Prädikate formalisiert werden. Im Wissen, dass dies möglich ist, möchte ich sie jedoch weiter als Eigennamen notieren, ebenso wie ich die funktionalen Notationen der Mathematik übernehme. Schließlich soll die Festlegung gelten, dass der Zeitpunkt Null den 1. Januar 1900 um 9 Uhr bezeichnet. Damit kann der obige Satz so formuliert werden:

> (V) Für alle s_1 und s_2 gilt: Ist s_1 Ortsfunktion von einem Ende des Urmeters und s_2 Ortsfunktion des anderen, dann gilt: $|s_1 - s_2| = \mu$.

Somit geht aus $\widetilde{M}$ hervor, dass das Urmeter mit der Zeit länger wird und damit auch alle anderen Objekte, deren Größe uns konstant erscheint – Letzteres folgt allerdings nicht rein theoretisch, sondern aufgrund empirischer Daten, nämlich Größenvergleichen zwischen Urmeter und den anderen Objekten. Insbesondere wächst der Abstand eines scheinbar ruhenden Objekts zu einem scheinbar ruhenden Koordinatenursprung exponentiell. Eine konstante Ortsfunktion dagegen beschreibt die Position eines Köpers, der uns so erscheint, als verringere sich sein Abstand zum Nullpunkt des Koordinatensystems exponentiell. (Ich setze hier eine gewisse Verwendungsweise des Begriffs „Ortsfunktion" voraus, die bei vollständiger Formalisierung von $\widetilde{M}$ axiomatisiert werden müsste: Eine Ortsfunktion gibt Koordinaten bezüglich eines Inertialsystems an, und zwar verstehe ich hier Inertialsystem im üblichen Sinne als System, in dem keine Scheinkräfte beobachtet werden können, oder, um es unabhängig vom theoretischen Kraftbegriff zu formulieren: ein Bezugssystem, in dessen Nullpunkt ein tatsächlicher Kraftmesser keine Scheinkräfte anzeigen würde.)

Betrachten wir nun einen Körper, der einen scheinbar konstanten Abstand zu einem beliebig gewählten Koordinatenursprung hat. Beträgt dieser Abstand zum Zeitpunkt Null 1 w, dann beschreibt

$$s(t) = \mu(t)$$

seinen Ort zu jeder Zeit t bezüglich des gewählten Koordinatensystems. Üblicherweise bezeichnet „Geschwindigkeit“ die Änderung der Ortsfunktion, im gewählten Beispiel beträgt die Geschwindigkeit des Körpers also $\dot{s} = \alpha\mu$ (ich verwende die Kurznotationen $\dot{s}$ und $\ddot{s}$ für die erste und zweite zeitliche Ableitung von s). Fasst man die Beschleunigung als Änderung der Geschwindigkeit auf, ergibt sich für sie $\ddot{s} = \alpha^2\mu$. Übernimmt man weiterhin den Satz, dass die Kraft, die auf einen Körper mit Masse m und Beschleunigung a wirkt, gerade $m \cdot a$ beträgt, so folgt, dass auf den scheinbar ruhenden Körper die Kraft $m\alpha^2\mu$ wirkt. Das allein ist unproblematisch, denn wie im letzten Abschnitt erläutert, handelt es sich hier nicht um eine Kraft im Sinne der klassischen Mechanik, keine Angabe in Newton. Trotzdem stellt diese Tatsache ein Problem für den weiteren Aufbau von $\widetilde{M}$ dar: Wie müssen, einen solchen Kraftbegriff vorausgesetzt, beispielsweise Sätze wie das Wechselwirkungsprinzip formuliert werden? In der Mechanik wird die Kraft auf einen Körper stets von einem anderen Körper ausgeübt, dieser übt wiederum eine entgegengesetzte Kraft auf jenen aus. Das ist unvereinbar damit, dass die Theorie eine stetig wachsende Kraft auf einen unbewegten Körper im sonst leeren Raum behauptet.

Um die Konsistenz der gerade entstehenden Theorie $\widetilde{M}$ sicherzustellen, muss an einer dieser drei Stellen eine Modifikation vorgenommen werden: Beim Wechselwirkungsprinzip, bei $F = ma$ oder bei der mathematischen Bedeutung von Geschwindigkeit oder Beschleunigung. Letzteres erscheint mir wenig sinnvoll, da es sich bei den Definitionen dieser Begriffe weniger um von Physikern initiierte Festlegungen handelt, als um die mathematische Präzisierung sprachlicher Übereinkünfte: Es ist keine Erfindung der Theoretiker, dass etwas, das seinen Ort ändert, eine Geschwindigkeit hat. Ebensowenig, dass man beim Schnellerwerden von Beschleunigung spricht. Wenn die Theorie ein exponentielles Wachstum jeder Strecke und damit das Schnellerwerden scheinbar ruhender Objekte aussagt, sollte sie also auch diesen Objekten eine Beschleunigung zuordnen. Der naheliegendste Weg, mit dem oben aufgeworfenen Problem umzugehen, ist sicher eine Modifikation von $F = ma$: Es wäre zumindest aus alltagssprachlicher Sicht erstaunlich, im Lichte der letzten Überlegungen noch zu behaupten, auf jeden beschleunigten Körper wirke eine Kraft – eine Kraft, die zwar unermesslich groß sein kann, aber nicht messbar ist.

Um herausfinden zu können, was in $\widetilde{M}$ das Gesetz $F = ma$ ersetzen soll, muss ich für den Moment wieder „empirische Größen“ einführen: Bezeichnet s den Zahlenwert einer Ortsangabe in w, dann soll $\bar{s}$ der Zahlenwert einer entsprechenden Angabe in Metern sein. Es gilt also für Ortsfunktionen

$$s(t) = \mu(t) \cdot \bar{s}(t).$$

Entsprechend sollen empirische Geschwindigkeit $\bar{v} = \dot{\bar{s}}$ und Beschleunigung $\bar{a} = \ddot{\bar{s}}$ erklärt sein. Aus diesen Festlegungen und den Ableitungen

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \alpha\mu \cdot \bar{s} + \mu \cdot \bar{v} = \mu \cdot (\bar{v} + \alpha\bar{s}) \qquad \text{und} \\ \ddot{s} &= \alpha\mu \cdot (\bar{v} + \alpha\bar{s}) + \mu \cdot (\bar{a} + \alpha\bar{v}) = \mu \cdot (\bar{a} + 2\alpha\bar{v} + \alpha^2\bar{s}) \end{aligned}$$

ergeben sich die Zusammenhänge

$$\bar{v} = \frac{\dot{s}}{\mu} - \alpha\bar{s} = \frac{\dot{s}}{\mu} - \alpha\frac{s}{\mu} = \frac{1}{\mu} \cdot (\dot{s} - \alpha s),$$

sowie

$$\begin{aligned} \bar{a} &= \frac{\ddot{s}}{\mu} - 2\alpha\bar{v} - \alpha^2\bar{s} \\ &= \frac{\ddot{s}}{\mu} - 2\alpha\frac{1}{\mu} \cdot (\dot{s} - \alpha s) - \alpha^2\frac{s}{\mu} \\ &= \frac{1}{\mu} \cdot (\ddot{s} - 2\alpha\dot{s} + \alpha^2 s). \end{aligned}$$

Damit nicht die aufgrund der Verdopplung gegebene Beschleunigung Kräfte verursacht, sondern nur die Beschleunigung, die man auch beobachten kann, darf in $\widetilde{M}$ also nicht $F = m \cdot \ddot{s}$ gelten, sondern

$$F = m \cdot \bar{a} = m \cdot \frac{1}{\mu} \cdot (\ddot{s} - 2\alpha\dot{s} + \alpha^2 s).$$

Im obigen Beispiel war die Ortsfunktion mit μ identisch. Setzt man entsprechend $v = \alpha\mu$ und $a = \alpha^2\mu$ ein, ergibt sich wie gewünscht $\bar{a} = 0$: Auf einen scheinbar ruhenden, tatsächlich jedoch exponentiell beschleunigten Körper wirkt also gemäß $F = m\bar{a}$ keine Kraft ($\bar{a}$ darf hier nur als Abkürzung verstanden werden).

Eine explizite Fassung des Gesetzes $F = m\bar{a}$ könnte so lauten:

> ($F_{\widetilde{M}}$) Für alle x, f, s und m gilt: Ist x ein Körper, s die Ortsfunktion von x und m die Masse von x und auf x wirkt die Kraft f, dann gilt $f = m \cdot \frac{1}{\mu} \cdot (\ddot{s} - 2\alpha\dot{s} + \alpha^2 s)$.

Diese Modifikation des entsprechenden Gesetzes (F_M) aus M entspricht dem Ersetzen der tatsächlichen Ortsfunktion s durch die empirische Ortsfunktion $\bar{s} = {}^{s}/_{\mu}$. Analog könnte man nun weiter verfahren und bekannte physikalische Gesetze zu $\widetilde{M}$-Gesetzen machen, indem jedes Vorkommen einer Ortsfunktion s durch ${}^{s}/_{\mu}$ ersetzt wird.

Bevor ich zur Diskussion von $\widetilde{M}$ in Bezug auf die Unterbestimmtheitsthese komme, sei folgende Anmerkung gemacht: Selbst wenn hier ein Beispiel für Unterbestimmtheit gefunden wäre – keinem Physiker würde es Kopfschmerzen bereiten. Schließlich ist es mit einem enormen Aufwand verbunden, mit Hilfe der Sätze aus $\widetilde{M}$ beobachtbare Vorhersagen zu machen. Um überhaupt die Ortsfunktion eines Körpers angeben zu können, muss anhand eines real existierenden Maßstabs seine Position in einem Koordinatensystem gemessen werden, schon hier geht also gezwungenermaßen so etwas wie das alte Metermaß ein. Nun müsste der Physiker berechnen, welchem Wert in der neuen Streckeneinheit die Messung entspricht. Sind alle Messdaten umgerechnet, müssen die entsprechenden Gleichungen, die sich aus den $\widetilde{M}$-Gesetzen ergeben, gelöst werden – in den meisten Fällen ein im Vergleich zur Standardphysik deutlich größerer Aufwand. Schließlich sind die Ergebnisse nicht unmittelbar empirisch verifizierbar, da Strecken stets in w angegeben sind. Um sie tatsächlich anhand von Beobachtungen prüfen zu können, müssen sie wieder in einen beobachtbaren Maßstab umgerechnet werden.[5] Man könnte also ohne Zögern aus Einfachheitsgründen $\widetilde{M}$ zugunsten von M verwerfen.

Trotzdem wäre es interessant, in dieser Theorie ein Beispiel für Quines These zu finden. Beide Theorien sind empirisch äquivalent und auch logisch inkompatibel, denn beispielsweise über die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit sagen sie Gegensätzliches aus. Allerdings: Es gibt eine naheliegende Umdeutung der Prädikate, durch die $\widetilde{M}$ zu M logisch äquivalent wird.

3.2 Die Umdeutung der Prädikate

Die Konstruktion von $\widetilde{M}$ lässt schon eine passende Umdeutung der Prädikate erahnen: Das zweistellige Prädikat „ist die Ortsfunktion von“ wird auf den offenen Satz „$\frac{s}{\mu}$ ist die Ortsfunktion von x“ (mit freien Variablen s und x) abgebildet. Bezeichnet U die entsprechende Umdeutung der Sätze, so sind

> ($U(F_{\widetilde{M}})$) Für alle x, f, s und m gilt: Ist x ein Körper, $\frac{s}{\mu}$ die Ortsfunktion von x und m die Masse von x und wirkt auf x die Kraft f, dann gilt $f = m \cdot \frac{1}{\mu} \cdot (\ddot{s} - 2\alpha\dot{s} + \alpha^2 s)$.
>
> und
>
> (F_M) Für alle x, f, s und m gilt: Ist x ein Körper, s die Ortsfunktion von x und m die Masse von x und auf x wirkt die Kraft f, dann gilt $f = m \cdot \ddot{s}$.

[5] Man könnte einwenden, dass $\widetilde{M}$ und M dann wohl nicht empirisch äquivalent sein können. Tatsächlich halte ich es aber für unangemessen, Sätze in denen der Ausdruck „Meter“ vorkommt, als Beobachtungssätze aufzufassen – ein geradezu absurder Gedanke, wenn man sich die moderne Definition des Meters vergegenwärtigt, nämlich als Strecke, die das Licht in 299792458^{-1} Sekunden zurücklegt. Und auch bei Verwendung der Urmeter-Definition müsste der Ausdruck „Meter“ aufgelöst werden, um einen Beobachtungssatz zu erhalten – die mathematische Beschreibung einer physikalischen Größe ist im Allgemeinen kein Beobachtungssatz. Dass etwas ein Meter lang ist, bedeutet, dass es genau so lang wie das Urmeter ist. Eben eine solche Auflösung muss in $\widetilde{M}$ auch stattfinden, nur ist sie dort viel komplizierter.

äquivalent: Dafür, dass (F_M) $(F_{\widetilde{M}})$ impliziert, habe ich bereits argumentiert – $(F_{\widetilde{M}})$ ergab sich ja gerade daraus, dass man in (F_M) als Ortsfunktion $\frac{s}{\mu}$ einsetzt. Die Umkehrrichtung kann durch Ausrechnen der Ableitungen gezeigt werden: Wenn $\frac{s}{\mu} =: o$ die Ortsfunktion eines Körpers x ist, dann bezeichnet s das Produkt $o \cdot \mu$. Damit gilt:

$$\begin{aligned} m \cdot \frac{1}{\mu} \cdot (\ddot{s} - 2\alpha\dot{s} + \alpha^2 s) &= m \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{d}{dt}(\dot{o}\mu + o\alpha\mu) - 2\alpha(\dot{o}\mu + o\alpha\mu) + \alpha^2 o\mu \right) \\ &= m \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \left(\ddot{o}\mu + \dot{o}\alpha\mu + \dot{o}\alpha\mu + o\alpha^2\mu - 2\alpha(\dot{o}\mu + o\alpha\mu) + \alpha^2 o\mu \right) \\ &= m \cdot \ddot{o} \end{aligned}$$

Was geschieht mit der Verdopplungsthese unter U? In ihrer expliziten Fassung lautet sie:

> (V) Für alle s_1 und s_2 gilt: Ist s_1 Ortsfunktion von einem Ende des Urmeters und s_2 Ortsfunktion des anderen, dann gilt: $|s_1 - s_2| = \mu$.

Daraus ergibt sich durch Ersetzungen gemäß U:

> $(U(V))$ Für alle s_1 und s_2 gilt: Ist s_1/μ Ortsfunktion von einem Ende des Urmeters und s_2/μ Ortsfunktion des anderen, dann gilt: $|s_1 - s_2| = \mu$.

Sind $o_1 = s_1/\mu$ und $o_2 = s_2/\mu$ die Ortsfunktionen der beiden Enden des Urmeters, dann gilt gemäß $(U(V))$

$$|s_1 - s_2| = |o_1\mu - o_2\mu| = |\mu \cdot (o_1 - o_2)| = \mu.$$

Da μ stets positive Werte annimmt, folgt hieraus $|o_1 - o_2| = 1$, was der Definition des Meters anhand der Länge des Urmeters in M entspricht. Ausformuliert lautet diese Definition:

> Für alle o_1 und o_2 gilt: Ist o_1 Ortsfunktion von einem Ende des Urmeters und o_2 Ortsfunktion des anderen, dann gilt: $|o_1 - o_2| = 1$.

Offensichtlich folgt hieraus auch $(U(V))$: Sind s_1/μ und s_2/μ die zwei Ortsfunktionen der beiden Urmeterenden, dann gilt

$$\left| \frac{s_1}{\mu} - \frac{s_2}{\mu} \right| = \left| \frac{1}{\mu} \cdot (s_1 - s_2) \right| = 1, \text{ also } |s_1 - s_2| = \mu.$$

Also: Die beschriebene Theorie $\widetilde{M}$, die von allen Längen eine exponentielle Vergrößerung aussagt und entsprechend zu jeder Ortsfunktion den Faktor μ hinzufügt, ist keineswegs eine neue Theorie im strengen Sinne Quines. Damit bleibt die Frage: Was bedeutet das? Sind die willkürlichen Schritte bei der Konstruktion von $\widetilde{M}$ möglicherweise der Grund für dieses Scheitern? Könnte man auf andere Weise ein Beispiel für Quines These konstruieren? Oder legt die Schwierigkeit, ein Beispiel zu finden, gar ihre Falschheit nahe? Diesen Fragen möchte ich im letzten Abschnitt nachgehen.

4 Interpretation des Scheiterns

Bereits in der Einleitung habe ich darauf hingewiesen, dass ich natürlich keine völlig neue Physik erfinden kann und insofern alle potentiellen Beispieltheorien an der Standardphysik ausrichten muss. Vermutlich wollte Quine aber durch die Einführung der Umdeutung von Prädikaten vermeiden, eben solche Modifikationen als neue Theorien bezeichnen zu müssen. Das Instrument *Umdeutung der Prädikate* hat hier also seinen Zweck erfüllt. An einigen Stellen habe ich in gewisser Weise willkürliche Entscheidungen getroffen, zum Beispiel bei der expliziten Formulierung physikalischer Gesetze. Deshalb gibt es zwar andere Möglichkeiten, M und $\widetilde{M}$ zu formulieren, aber stets muss $\widetilde{M}$ eine systematische Modifikation von M bleiben, möchte man die empirische Äquialenz beider Theorien sicherstellen. Insofern wäre das Ergebnis der Arbeit wohl stets das gleiche geblieben.

Eine Feststellung der Form „Wir können X empirisch nicht ausschließen, also gibt es eine zu M empirisch äquivalente Theorie, die X aussagt.“ kann also offenbar kein Beispiel für die Unterbestimmtheitsthese liefern. Vielmehr müsste man eine neue Art und Weise erdenken, Beobachtungsdaten theoretisch zu begründen. Die entscheidende Frage ist dann, ob die dadurch entstehende Theorie ihrer Struktur nach von der Standardphysik so stark abweicht, dass sie durch keine Umdeutung der Prädikate zu ihr äquivalent werden kann. Das ist eine offene Frage und Quines Positionierung zu ihr erscheint durchaus spekulativ.

Ebenfalls offen ist, ob das Instrument *Umdeutung der Prädikate* angemessen ist, um „fundamental neue“ Theorien von „bloßen Modifikationen“ zu unterscheiden. In diesem Fall hat es sich bewährt. Und tatsächlich liegt es nahe, dass bloße Modifikation sich stets durch eine Umdeutung der Prädikate in die Ausgangstheorie überführen lassen – schließlich lässt sich die Modifikation selbst formal durch eine Umdeutung der Prädikate beschreiben. Umgekehrt gibt es aber möglicherweise Theorien, die Ausdruck grundverschiedener Vorstellungen von der Welt sind und trotzdem durch eine Umdeutung der Prädikate ineinander überführt werden können. In diesem Sinne sind Quines Kriterien dafür, wann zwei Theorien verschieden sind, vielleicht zu strikt. Möglicherweise auch deshalb schwächt er am Ende seines Aufsatzes die Unterbestimmtheitsthese so ab:

> „[A] last-ditch version of the thesis of under-determination would assert merely that our system of the world is bound to have empirically equivalent alternatives which, if we were to discover them, we would see no way of

reconciling by reconstrual of predicates.“[6]

Vielleicht ist das auch als Abschwächung des Theoriebegriffs zu verstehen: Damit zwei Theorien verschieden sind, müssen sie lediglich strukturell so stark differieren, dass wir es nicht schaffen, sie durch eine Umdeutung der Prädikate ineinander zu überführen. So löst Quine das Problem, dass Umdeutungen der Prädikate ein zu mächtiges Instrument sein könnten und damit der Theoriebegriff zu eng. Aber selbst in dieser Fassung ist die These noch spekulativ. Ob sie zutrifft, lässt sich theoretisch wohl nicht zwingend begründen und lediglich anhand von Beispielen untersuchen. Doch auch bei solchen Untersuchungen hat die Unterbestimmtheitsthese einen schweren Stand: Selbst für konkrete Theorien wäre es, wenn überhaupt, nur mit enormem Aufwand möglich, ein Beispiel anzugeben – anhand formaler Fassungen der Theorien müsste die wissenschaftliche Gesellschaft nach intensiver Arbeit zum Schluss gelangen: Vermutlich gibt es keine Umdeutung der Prädikate, durch die beide Theorien äquivalent werden. Wie man in dieser Arbeit gesehen hat, ist es dagegen unter Umständen recht einfach, eine passende Umdeutung der Prädikate anzugeben.

Die Arbeit mit der Verdopplungsthese hat also verdeutlicht, wie hoch die Hindernisse sind, die überwunden werden müssen, um tatsächlich ein Beispiel für Unterbestimmtheit geben zu können. Es genügt sicher nicht, bloß die Möglichkeit zu erkennen, dass die Welt anders beschaffen sein könnte, als die Physik suggeriert.

[6] Quine, S. 327.

Literatur

[1] Quine, Willard Van Orman: On Empirically Equivalent Systems of the World. In: Erkenntnis 9 (1975), S. 313-328.