

# **Messung und Invarianz – Ein Beitrag zum Metrologischen Strukturalismus**

Alexander Ehmann

03. Oktober 2014

Preprint. Erscheint in *Philosophia naturalis*, Heft 2 2013 [2015]

Universität Tübingen, Philosophisches Seminar, Bursagasse 1, D-72070 Tübingen

eMail: [alexanderehmann@alexanderehmann.com](mailto:alexanderehmann@alexanderehmann.com)

# Messung und Invarianz – Ein Beitrag zum Metrologischen Strukturenrealismus

## Zusammenfassung

Der vorliegende Aufsatz ist ein Beitrag zur Entwicklung des Metrologischen Strukturrealismus (MSR). Diese Wissenschaftstheoretische Position geht auf Matthias Neuber zurück, der sie als dritte Spielart zwischen den großen Strukturrealismen – dem Epistemischen Strukturrealismus (ESR) und dem Ontischen Strukturrealismus (OSR) – ansiedelt. Neuber versucht, die wissenschaftstheoretischen Probleme von ESR und OSR anzugehen, gleichzeitig aber ihre jeweiligen Stärken beizubehalten. Dabei sind die Konzepte der Invarianz, der Struktur und besonders der Messung von zentraler Bedeutung. Ausgehend von Eino Kailas „non-linguistic, realist account of logical empiricism“ untersucht der vorliegende Aufsatz die Notwendigkeit einer weiteren strukturrealistischen Position. Dazu werden die etablierten Strukturrealismen auf ihre Stärken und Schwächen hin untersucht. Es folgt eine Ausformulierung der Forderungen an den MSR, die über die Darstellung bei Neuber hinaus geht. Diese Forderungen sind ontologischer, epistemischer und metrologischer Natur.

## Abstract

The present article is a contribution to the development of metrological structural realism (MSR). This position of philosophy of science goes back to Matthias Neuber, who introduces it as a third variation of the main structural realisms: epistemic structural realism (ESR) and ontic structural realism (OSR). Here, Neuber attempts to tackle the problems of OSR and ESR while preserving their respective strengths. Of central importance to his approach, are the concepts of invariance, structure and, especially, measurement. Starting from Eino Kaila's „non-linguistic, realist account of logical empiricism“, the present article investigates the necessity of yet another position of structural realism. The established structural realisms are examined for their strengths and weaknesses. Afterwards, the requirements on MSR are formulated in a way that extends beyond Neuber's account. These requirements are of ontological, epistemological and metrological nature.

## 1 Einleitung

Im Jahr 2012 hat Matthias Neuber am Ende seines Aufsatzes *Invariance, Structure, Measurement – Eino Kaila and the History of Logical Empiricism*<sup>1</sup> einen interessanten Vorschlag gemacht, diesen aber nicht besonders weit ausgeführt. Es geht dabei um eine weitere Form des Strukturrealismus: Den *Metrologischen Strukturrealismus* (MSR).

Der MSR sucht seinen Platz als dritte Spielart zwischen den beiden großen Strukturrealisten – dem Epistemischen Strukturrealismus (ESR) einerseits und dem Ontischen Strukturrealismus (OSR) andererseits – und versucht, deren jeweilige Probleme bei gleichzeitiger Beibehaltung ihrer Stärken zu umgehen. Dabei ist das Konzept der Messung und ihrer invarianzkonstituierenden Funktion von zentraler Bedeutung. Die Idee, das Konzept der Messung als invarianzkonstituierendes Moment in der wissenschaftlichen Theorienbildung zu begreifen, findet sich schon bei Eino Kaila. Auf dessen *Über den physikalischen Realitätsbegriff – Zweiter Beitrag zum Logischen Empirismus*<sup>2</sup> von 1941 nimmt Neubers Argumentation starken Bezug.

Zu Beginn des folgenden Abschnitts soll Neubers Darstellung von Kailas *non-linguistic, realist account of logical empiricism* nachgezeichnet werden. Ich werde dazu kurz auf Kailas Positionierung zum Realismusproblem eingehen. Anschließend daran sollen die Kernkonzepte *Invarianz, Struktur* und *Messung*, wie sie sich in Kailas Wissenschaftstheorie wiederfinden, genauer untersucht werden.<sup>3</sup> Es soll gezeigt werden, dass die Konzepte *Invarianz, Struktur* und *Messung* fast untrennbar miteinander verknüpft sind. Sie alle sind für die vorliegende Arbeit von großer Bedeutung.

Daran anschließend werden wir uns mit Neubers Entwurf des MSR befassen. Aufgrund der Tatsache, dass es sich hierbei eben um einen Entwurf handelt, der bis dato eher in Form einer Skizze vorliegt, entspricht die hier gegebene, ausführlichere Darstellung des MSR nicht notwendigerweise den Vorstellungen des Ideengebers. Wir werden ihn vielmehr so entwickeln, dass er als wissenschaftstheoretische Position fruchtbar sein kann. In der Präsentation der ersten Idee des MSR folgen wir aber zu weiten Teilen den Ausführungen Neubers. Da der Metrologische Strukturrealismus sich zunächst als Abgrenzung zu den etablierten Strukturrealisten zeigt, werden wir diesen Positionen

einige Aufmerksamkeit widmen. Es sollen sowohl die jeweiligen Probleme, aber auch die Stärken der verschiedenen Spielarten des ESR und des OSR aufgezeigt und erläutert werden. Außerdem soll geklärt werden, inwiefern der MSR als eigenständige Position zwischen ESR und OSR formuliert werden kann, welche Anleihen er bei ihnen nimmt, worin er sich von ihnen unterscheidet und sogar über sie hinaus geht. Es werden einige Forderungen des MSR formuliert, wobei die Implementierung von Kailas *non-linguistic, realist account of logical empiricism* in den MSR eine zentrale Rolle spielen wird.

## 2 Kailas non-linguistic, realist account of logical empiricism

### 2.1 Das Realismusproblem bei Kaila

Im Wiener Kreis galt die vorherrschende Meinung, dass es sich bei der Realismusdebatte um die Diskussion eines Scheinproblems handle, dessen Lösung allenfalls im Bereich der Metaphysik zu suchen, und das dementsprechend in der Wissenschaft beziehungsweise der wissenschaftlichen Philosophie nicht zu verhandeln sei. Für Eino Kaila dagegen war das Realismusproblem eines der wichtigsten Probleme der Philosophie überhaupt. Folgt man Ilkka Niiniluoto und seiner Darstellung in *Eino Kaila and Scientific Realism*<sup>4</sup>, so ergab sich daraus ein angespanntes Verhältnis zwischen Carnap, Schlick und Kaila:

Throughout his philosophical career Eino Kaila regarded the choice between realism and anti-realism as an important and fascinating problem. This created a serious tension between him and the leaders of the Vienna Circle – Moritz Schlick and Rudolf Carnap – who wanted to banish the realism debate from science and place it within metaphysics. (Niiniluoto 1992, S. 103.)

Während Carnap und Schlick also auf die Behandlung des Realismusproblems ganz verzichten wollten, folgte Kaila der Intuition, dass zu dieser Frage eben doch etwas Substantielles zu sagen sei. Dabei begnügte er sich auch nicht damit, die Realismusdebatte in den Bereich des Sprachlichen zu verlagern. Der an den Logischen Empirismus des Wiener Kreises anschließende *Linguistic Turn* gestattete zwar die Diskussion des Realismusproblems, reduzierte es aber auf ein rein sprachliches. Kaila war das nicht genug. Als Naturphilosoph ging es ihm um die Frage, wie die Realität

tatsächlich beschaffen sei und eben nicht nur darum, wie wir die uns gegebene Wirklichkeit sprachlich beschreiben. Niiniluoto formuliert das wie folgt:

Kaila had great respect for the exact philosophical method of the Vienna Circle. He consequently strived for a careful formulation of the realism issue, one that would satisfy the critical demands of the new logical empiricism. But it was clear that Kaila – the philosopher of nature who sought to solve the riddle of reality – could not follow the linguistic turn of analytical philosophy: for him the deepest problems of philosophy concern reality rather than language. (Niiniluoto 1992, S. 103.)

Kaila teilte also weder Carnaps Position, dass das Realismusproblem nur ein Scheinproblem und dementsprechend nicht ernsthaft zu verhandeln sei<sup>5</sup>, noch folgte er den Vertretern des Linguistic Turn wie etwa Reichenbach<sup>6</sup> und später Feigl<sup>7</sup> in ihrer Ansicht, dieses Problem sei im Grunde ein rein sprachliches und als eben solches zu behandeln. Für ihn sollte das Realismusproblem unabhängig von linguistischen Problemstellungen behandelbar sein. Dennoch hatte, wie Niiniluoto im eben zitierten Text bemerkt, Kaila große Hochachtung für die exakten Methoden des Wiener Kreises und des „neuen Logischen Empirismus“.

Neuber (2012) fasst drei Thesen zusammen, die in Kaila (1941)<sup>8</sup> dem Logischen Empirismus zugeschrieben werden:

- 1 There are no synthetic judgments *a priori*.<sup>9</sup>
- 2 In order to count as scientific, statements must, in principle, be testable.<sup>10</sup>
- 3 Statements about physical things must be translatable into statements about particular perceptions.<sup>11</sup>

Wie Neuber zeigt,<sup>12</sup> verwirft Kaila die letzte dieser drei Thesen als unnötig. Kaila selbst schreibt:

Für den in dieser Arbeit durchzuführenden Beweisgang ist freilich die Annahme der Übersetzbarkeit nicht notwendig; die Prüfbarkeit würde genügen. (Kaila 1941, S. 31.)

Gerade hierin, so Neuber, findet sich die Grundlage für Kailas Unterscheidung zwischen dem Logischen *Empirismus* einerseits und dem Logischen *Positivismus* andererseits. Der Logische Positivismus versuche, durch die Forderung der Übersetzbarkeit

wissenschaftlicher Aussagen in Aussagen über Wahrnehmungen, erstere auf letztere zu reduzieren und begehe gerade darin einen Fehler. Folgt man dieser Unterscheidung, so bedeutet die Ablehnung der dritten These des Logischen Empirismus die Ablehnung des Logischen Positivismus insgesamt und stößt erst „die Tür zu einer realistischen Auffassung von Wissenschaft und Natur“ auf.<sup>13</sup>

These 3 und ihre Ablehnung soll an dieser Stelle noch etwas ausführlicher diskutiert werden, auch im Zusammenhang mit These 2, die Kaila und Neuber ja nicht verwerfen wollen. Zunächst sei die Bemerkung gestattet, dass die Ablehnung der These 3 im Rahmen der Entwicklung einer realistischen Position bezüglich der Naturwissenschaften kaum verwundern kann. Nicht bloß würden mit ihr Aussagen, etwa über Atome oder andere, in der Regel unbeobachtbare Gegenstände der Natur, als unwissenschaftlich ausgezeichnet. Auch die Aussagen einer bis dato noch nicht überprüften Theorie würden damit aus dem Bereich des Wissenschaftlichen verbannt. In der Folge wäre bereits die reine *Spekulation*, nicht nur über *prinzipiell Unbeobachtbares*, sondern auch über lediglich *de facto noch nicht Beobachtetes*, wissenschaftlich unredlich. Das allerdings entspricht in keinster Weise der gängigen wissenschaftlichen Praxis, und das tat es auch zu Zeiten Schlicks, Carnaps, Reichenbachs, Feigl's und Kailas nicht.

Darüber hinaus könnte es für die später in dieser Arbeit anzustellenden Betrachtungen lohnenswert sein, noch einen kurzen Blick auf These 2 und ihr Verhältnis zu These 3 zu werfen. Mit These 2 wird eine Forderung an wissenschaftliche Aussagen gestellt, nämlich die, dass solche Aussagen prinzipiell überprüfbar sein sollen. Kaila übernimmt diese Forderung, ebenso Neuber in leicht abgewandelter Form bei der ersten Formulierung des Metrologischen Strukturrealismus. Wenn man so möchte, ist These 2 eine schwächere Version der These 3, die, wie wir bereits festgestellt haben, vor dem Hintergrund tatsächlicher wissenschaftlicher Praxis so nicht haltbar ist. Während These 3 eine *unmittelbare Übersetzbarkeit* wissenschaftlicher Aussagen in Aussagen über Wahrnehmungen einfordert, verlangt These 2 lediglich die *Testbarkeit* solcher Aussagen. Nun muss man sich freilich die Frage gefallen lassen, was genau diese Testbarkeit denn eigentlich sein, worin sie zum Ausdruck kommen soll. Ohne Zweifel spielt bei allen Tests, die eine von Menschen aufgestellte These überprüfen sollen, irgendeine Form der

Beobachtung eine Rolle, und wenn diese Beobachtung auch nur darin besteht, die Anzeige eines Messgeräts oder eines Bildschirms abzulesen. Insofern findet auch bei der Überprüfung wissenschaftlicher Aussagen im Sinne der These 2 irgendwann eine Übersetzung in Aussagen über Wahrnehmungen statt, oder kann wenigstens prinzipiell stattfinden – man muss diese Aussagen über Wahrnehmungen ja nicht tatsächlich ausformulieren. Im ersten Moment könnte das den Positivisten freuen, scheint es doch so, als käme auch der nicht-positivistische Empirist nicht ohne die positivistische Übersetzbarkeitsforderung, also auch nicht ohne These 3, aus. Das allerdings stimmt nur zur Hälfte. Ja, in der Tat findet an irgendeiner Stelle eine Übersetzung in Aussagen über Wahrnehmungen statt oder kann im Prinzip stattfinden. Allerdings handelt es sich bei den Aussagen, die da potentiell übersetzt werden, in der Regel nicht um die zu überprüfenden wissenschaftlichen Hypothesen, sondern um *Hilfshypothesen*, die gerade zum Zwecke der Überprüfung der eigentlichen Hypothesen mit angegeben werden. Ein Beispiel: Wenn wir die Hypothese aufstellen, dass an einer Stromquelle eine Spannung anliegt, dann werden wir nicht die direkte Beobachtbarkeit dieser Spannung einfordern, wie wir es entsprechend These 3 müssten. Stattdessen werden wir eine Hilfshypothese aufstellen: Wenn eine Spannung an der Stromquelle anliegt, dann wird ein Spannungsmessgerät ausschlagen, sobald wir es anschließen. Diesen Ausschlag des Messgeräts können wir beobachten und prinzipiell in Aussagen über Wahrnehmungen übersetzen. Die Spannung als solche können wir nicht beobachten, was wir gemäß These 3 aber müssten, um unsere Aussage als eine Aussage über physikalische Dinge verstehen zu dürfen. Der strenge Positivist darf demnach nur Aussagen über direkt Beobachtbares treffen, während der nicht-positivistische Empirist auch Aussagen über lediglich indirekt Beobachtbares ernst nehmen kann. Das wird durch den Gebrauch von Hilfshypothesen als Werkzeuge der Überprüfung wissenschaftlicher Hypothesen ermöglicht. Zudem ist die Anerkennung der Rolle der Hilfshypothesen innerhalb des wissenschaftlichen Erkenntnisprozesses eine gute Grundlage zur Argumentation gegen die Behauptung, die empirische Wissenschaft sei von der menschlichen Erfahrungswirklichkeit vollständig abgetrennt und schon allein deshalb in Zweifel zu ziehen. Der Positivist kann, wenn er die Rolle der Hilfshypothesen anerkennt, also auch dieses Argument nicht mehr gegen den Empiristen stark machen.

Abgesehen davon, dass es sich bei der Forderung nach Überprüfbarkeit um eine Bedingung strenger Wissenschaftlichkeit handelt, mit der gewisse Theorien – etwa die Stringtheorie – durchaus hadern,<sup>14</sup> kann sie auch ein wichtiges Prinzip bei der Wahl der „richtigen“ Deutung quantenmechanischer Experimente sein. Je nachdem, ob These 2 auch dort gelten soll, scheinen gewisse, situationsspezifische Aussagen über die Eigenschaften der Objekte der Quantenmechanik zulässig oder nicht. Insofern scheint auch die Beantwortung der Frage, wann eine Deutung der Quantenmechanik eine realistische ist bzw. wann sie in den Bereich der metaphysischen Spekulation fällt, an die Annahme oder Ablehnung der These 2 geknüpft. Man könnte so argumentieren: Der Zustand eines quantenmechanischen Systems *vor der Messung* ist streng genommen nicht im Sinne der These 2 überprüfbar, da zu dieser Überprüfung ja die Überprüfung einer Hilfshypothese durch eine Messung notwendig ist. Nach der Messung befindet sich ein quantenmechanisches System in der Regel aber gerade nicht mehr im selben Zustand wie vor der Messung, ganz im Gegensatz zu klassischen Systemen, die von der Messung nicht oder nur in vernachlässigbarem Maße beeinflusst werden. Dementsprechend genügen konkrete Aussagen über den Zustand eines quantenmechanischen Systems, der nicht gemessen wurde oder vorher schon feststand, nicht der in These 2 formulierten Bedingung von Wissenschaftlichkeit und sollten folglich auch nicht realistisch gedeutet werden. Dem ist zu entgegnen: Eine realistische Deutung des Zustands eines noch nicht gemessenen, quantenmechanischen Systems ist eben *doch* möglich! Ganz recht: Ob ein Elektron in einer festgelegten Richtung  $X$  Spin up oder Spin down aufweist, steht erst nach der Messung fest. Wurde der Elektronspin zuvor in einer anderen Richtung  $Y$  gemessen – und damit festgelegt – können lediglich Wahrscheinlichkeiten für die Messung des Spins up oder down in  $X$ -Richtung angegeben werden. Diese Wahrscheinlichkeiten ergeben sich jedoch aus der häufigen Wiederholung eines solchen Experiments – Präparation des Systems mit Spin up in  $Y$ -Richtung, Messung des Spins in  $X$ -Richtung – und lassen sich auch mathematisch formulieren. Der Formalismus der Quantenmechanik enthält mit der Schrödingergleichung ja eine Möglichkeit zur Berechnung dieser Wahrscheinlichkeitsverteilung. Gerade weil sie aber aus tatsächlich durchgeführten Messungen gewonnen und als Gesetz in den Formalismus der Quantenmechanik eingegangen ist, genügen *Aussagen über die*

*Wahrscheinlichkeitsverteilung* von Spin up und down bezüglich eines quantenmechanischen Systems der in These 2 aufgestellten Forderung und dürfen durchaus realistisch gedeutet werden.

## 2.2 Invarianz, Struktur, Messung

In Neubers Darstellung von Kailas *non-linguistic, realist account of logical empiricism* werden drei wesentliche Elemente hervorgehoben:

[...] Kailas non-linguistic, realist account of logical empiricism (a) exploits the concept of invariance, (b) is built on an ontology of structures, and (c) is enhanced by Kailas theory of measurement. (Neuber 2012, S. 5.)

In den folgenden Abschnitten werde ich auf diese drei Punkte eingehen. Vor allem soll verdeutlicht werden, dass die drei genannten Konzepte *Invarianz*, *Struktur* und *Messung* keinesfalls für sich alleine stehen, sondern eng miteinander verknüpft sind.

### 2.2.1 Invarianz

Der Begriff der Invarianz bezeichnet bei Kaila ganz allgemein die Tatsache der Unveränderlichkeit eines Systems oder einer Eigenschaft eines System bei bestimmten Transformationen.<sup>15</sup> Neubers Beispiel hierfür ist eine Fläche, deren Größe bei einer Drehung im Raum unverändert bleibt. Die Drehung der Fläche ist hier die Transformation, gegenüber der die Größe der Fläche eine invariante Eigenschaft ist. Im Formalismus der Quantenmechanik wäre ein entsprechendes Beispiel die Anwendung eines Operators auf einen Zustandsvektor, so dass sich als Ergebnis dieser Operation derselbe Zustandsvektor ergibt. Messen wir etwa den Spin eines Elektrons in  $X$ -Richtung, haben dieses Elektron aber schon mit Spin *up* in  $X$ -Richtung präpariert, so ergibt diese Messung mit Sicherheit Spin *up* in  $X$ -Richtung. Die Eigenschaft des Elektrons, in  $X$ -Richtung Spin *up* aufzuweisen, ist gegenüber der durchgeführten Operation – die in anderen Fällen durchaus den Zustand des Systems ändern kann – invariant.

Von Besonderer Bedeutung ist im Rahmen dieses Aufsatzes allerdings, dass Invarianz für Kaila „the defining feature of reality“<sup>16</sup> darstellt:

There is knowledge only when some similarity, sameness, uniformity, analogy, in brief, some invariance is found and given a name. In knowledge, we are always concerned with invariances alone. The full significance of this fact will emerge gradually. (Kaila 1979b [1942], S. 131.)

Vor dem Hintergrund des eben Gesagten wird dann auch Kailas Zuordnung unterschiedlicher Realitätsebenen zu unterschiedlichen Graden von Invarianz verständlich.<sup>17</sup> Im Bereich der sinnlichen Wahrnehmung sind die Beobachtungen, die wir anstellen, kaum invariant. Ein und dieselbe Erdbeere sieht nicht immer gleich aus. Schon ihre Farbe ändert sich, wenn wir sie unter verschiedenen Lichtbedingungen betrachten. Ebenso wird sie für einen Beobachter mit Rot-Grün-Sehschwäche anders aussehen als für jemanden ohne diese Symptomatik. Darüber hinaus ist es auch nicht ausgeschlossen, dass unterschiedliche Beobachter trotz gleicher Rahmenbedingungen unterschiedliche Farbeindrücke haben. Wer will schon mit Sicherheit behaupten, dass seine Qualia von Rot denen eines anderen exakt entsprechen. Die Farbe einer Erdbeere ist demnach gegenüber gewisser Transformationen wie der Änderung der Lichtverhältnisse, der Physiologie des Auges, wahrnehmungspsychologischer Dispositionen usw. veränderlich, also auch nicht objektivierbar. Daraus folgt, dass sie im Kailaschen Sinne nicht oder nur wenig *real* ist.

Betrachten wir dagegen die Frage, welche Bereiche des elektromagnetischen Spektrums von der Erdbeere in welchem Maße reflektiert werden. Diese Frage kann mit Hilfe eines Spektrometers beantwortet werden, indem wir das Reflexionsvermögen der Erdbeere für einen bestimmten Wellenlängenbereich vermessen. Die Ergebnisse dieser Messung sind unabhängig vom persönlichen Farbempfinden eines Beobachters, folglich invariant gegenüber der „Beobachtertransformation“ und mithin objektivierbar. Dementsprechend korrespondiert die so gemessene Eigenschaft der Erdbeere einer höheren Realitätsebene als die subjektive Wahrnehmung eines Betrachters.<sup>18</sup>

An dieser Stelle ist noch nicht ganz klar, was genau es mit dem Konzept der Invarianz bei Kaila und dessen Bedeutung für sowohl Objektivitäts- als auch Realitätsbehauptungen auf sich hat. Dieser Umstand liegt in der Tatsache begründet, dass wir die mit diesem Konzept verquickten Begriffe Struktur und Messung wohl schon ein paar mal

angesprochen, jedoch noch nicht genau untersucht haben. Das soll in den folgenden Abschnitten geschehen.

## 2.2.2 Struktur

Wie oben bereits angedeutet gibt es bei Kaila ein hierarchisches System von Realitätsebenen, die entsprechend dem Grad der Invarianz, mit dem sie einhergehen, geordnet sind. Kaila unterscheidet dabei drei Ebenen:<sup>19</sup>

- Level 3: s-objects / physico-scientific objects (physikalische Gegenstände)
- Level 2: f-objects / physical objects (physische Gegenstände)
- Level 1:  $\varphi$ -objects / phenomenal objects

Die Gegenstände der *phänomenalen Wahrnehmung*, die so genannten  *$\varphi$ -objects*, befinden sich in dieser Darstellung auf der untersten Ebene. Erinnern wir uns an unser Beispiel von oben. Was wir dort als die wahrgenommene Farbe der Erdbeere beschrieben haben gehört in diese Kategorie. Da solche Wahrnehmungen in hohem Maße von den Rahmenbedingungen und individuellen Dispositionen des wahrnehmenden Subjekts abhängig sind, sind die Gegenstände dieser Ebene kaum invariant und deshalb auch nur wenig real. Dennoch bilden sie die epistemologische Basis des Kailaschen Konstitutionssystems: sie sind zwar in hohem Maße subjektiv, im selben Moment aber auch gerade das, was uns direkt zugänglich ist.

Auf der zweiten Ebene befinden sich die *f-objects*, also physische Gegenstände. Damit sind Objekte unserer Alltagswelt gemeint, etwa Tische, Menschen oder die Erdbeere aus dem Beispiel von oben. Sie sind weniger subjektiv als  *$\varphi$ -objects*, in höherem Maße invariant und damit auch realer als jene: ob man die Erdbeere nun unter diesem oder jenem Licht betrachtet, ob man an einer Fehlsichtigkeit leidet oder nicht, es handelt sich doch immer um ein und dieselbe Erdbeere, die über persistierende phänomenale Wahrnehmungen und von verschiedenen Beobachtern konstituiert wird. Diese Persistenz über verschiedene Rahmenbedingungen und Beobachter macht die größere Invarianz, damit Objektivität und folglich Realität der Gegenstände der zweiten Ebene aus.

Hierarchisch an oberster Stelle befinden sich in diesem System die *s-objects*. Sie sind *physikalische Gegenstände*, etwa Atome oder elektromagnetische Felder, aber auch physikalische Gesetze. In unserem Beispiel wäre hier die Beschreibung des Lichts, das die Erdbeere reflektiert, einzuordnen, aber eben nicht im Sinne einer Wahrnehmungsbeschreibung des Roteindrucks, der beim Betrachten der Frucht entsteht, sondern vielmehr die mit Hilfe eines Spektrometers unter exakt festgelegten Bedingungen vermessene Lichtintensität in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Reflexionsspektrums, mitunter auch im nicht sichtbaren Bereich. Diese Messung und die daraus resultierende Messkurve sind vom einzelnen Beobachter vollständig unabhängig. Ist das Verfahren genau spezifiziert und die benötigten Instrumente vorhanden und geeicht, kann die Messung von beliebigen Personen oder auch einer Maschine durchgeführt werden. Das Ergebnis bleibt dabei immer dasselbe. Aus diesem Grunde kommt den so gewonnenen Erkenntnissen das größte Maß an Invarianz, Objektivität und Realität zu.

Für das Verständnis von Kailas „system of the concepts of reality“ ist von besonderer Wichtigkeit, dass die Gegenstände einer Ebene die Gegenstände der jeweils höheren Ebene als *Systeme von Relationen*<sup>20</sup> konstituieren, und zwar in dem Sinne, dass die *invarianten Anteile* der Objekte einer Ebene, beispielsweise die rote Farbe und der typische Geschmack mehrerer  $\phi$ -objects, als konstitutiv für ein  $f$ -object der höheren Ebene angesehen werden. Hier gilt es zu beachten, dass ein Gegenstand einer höheren Ebene durchaus mehreren Gegenständen der darunterliegenden Ebene zugeordnet sein kann. So handelt es sich bei den Roteindrücken, die durch das Betrachten *einer* Erdbeere hervorgerufen werden, jeweils um *verschiedene*  $\phi$ -objects, welche dann zueinander ins Verhältnis gesetzt – man könnte auch sagen: miteinander verglichen – werden. Die *Relation*, die hierbei zum tragen kommt, ist freilich die der *Gleichheit* oder *Ähnlichkeit*, worin sich die Verwandtschaft zu Carnaps Konstitutionssystem<sup>21</sup> sehr deutlich zeigt.

Genau so vollzieht sich die Konstitution der  $s$ -objects als Systeme von Relationen zwischen  $f$ -objects. Diese werden miteinander verglichen, es wird von ihren unwesentlichen Eigenschaften abstrahiert, so dass am Ende jene Eigenschaften übrig bleiben, die für den Gegenstand und das aktuelle, wissenschaftliche Interesse von

Bedeutung sind. Betrachtet man beispielsweise die Masse eines Gegenstandes, so spielt seine Form und Größe keine Rolle. Man kann so tun, als ob es sich um eine punktförmige Masse handle. Will man nun etwas über die Gravitationskraft in Erfahrung bringen, die idealisiert punktförmige Massen aufeinander ausüben, so beobachtet man die gegenseitige Einflussnahme verschiedener solcher Massen in verschiedenen Abständen zueinander und versucht, eine Gesetzmäßigkeit zu entdecken.

Hier wird deutlich, dass der Übergang von f-objects zu s-objects ein wesentlich größeres Maß an Abstraktion und Idealisierung erfordert, als das beim Übergang von  $\phi$ -objects zu f-objects der Fall ist: Der Weg von konkreten Gegenständen zu punktförmigen Massen, von punktförmigen Massen zum Gravitationsgesetz ist bedeutend weiter als der vom roten Fleck im Gesichtsfeld zur Erdbeere. Nun handelt es sich bei den s-objects aber nicht – wie eben gezeigt – bloß um Abstraktionen von f-objects in dem Sinne, dass man sie gedanklich aller für die aktuelle Betrachtung unwichtiger Eigenschaften beraubt. Vielmehr sollen hierunter auch theoretische Terme wie Elektronen oder elektromagnetische Felder, außerdem andere theoretische Entitäten wie zum Beispiel Gleichungen, die Naturgesetze repräsentieren, fallen. Diese jedoch werden keinesfalls durch Abstraktion oder Idealisierung alltäglicher Gegenstände gewonnen. Sie sind zunächst Hypothesen, Schöpfungen des kreativen Geistes des Wissenschaftlers, von denen schließlich jene in den Kanon der aktuellen Theorien eingehen, die sich in der empirischen Überprüfung bewährt haben. Von einer direkten Konstitution der s-objects als Systeme von Relationen zwischen f-objects kann aus Sicht der wissenschaftlichen Praxis also nicht oder wenigstens nicht immer die Rede sein.

Überdies ist in Zweifel zu ziehen, ob es überhaupt einen fundamentalen Unterschied zwischen f-objects und nicht-gesetzesartigen s-objects gibt. Selbstverständlich unterscheiden sie sich in phänomenologischer Hinsicht: f-objects können mit Hilfe von  $\phi$ -objects konstituiert werden, s-objects jedoch nicht. Das heißt jedoch nur, dass f-objects im Gegensatz zu s-objects direkt beobachtbar sind, und zwar in dem Sinne, dass sie in unserem Wahrnehmungsapparat in Form von  $\phi$ -objects repräsentiert werden können. Gerade diese Unterscheidung zwischen direkt beobachtbaren und nicht direkt beobachtbaren Gegenständen aber ist hochgradig kontingent und deshalb voreilig. Dass

nämlich bloß f-objects ab einer gewissen Größe unserer pseudodirekten Wahrnehmung vermittelt  $\phi$ -objects zugänglich sind, kleinere jedoch nicht, hängt – wie gesagt – mit unserem Wahrnehmungsapparat zusammen. Allein jedoch die Tatsache, dass Atome zu klein, dass elektromagnetische Felder im Infrarotbereich zu langwellig sind, um von uns als  $\phi$ -objects repräsentiert und wahrgenommen zu werden, heißt nicht, dass sie einer anderen Ebene der Realität angehören. Die Grenzziehung zwischen den Ebenen scheint also recht willkürlich: Bakterien sind nicht direkt beobachtbar. Gehören sie deshalb zu den s-objects? Nun könnte man manche Hilfsmittel, beispielsweise Lichtmikroskope, zulassen. Alles, was damit beobachtbar ist, gehört noch in den Bereich der f-objects. Viren sind mit einfachen Lichtmikroskopen nicht zu beobachten, gehören demnach also zu den s-objects. Was aber, wenn man die Menge der zulässigen Hilfsmittel erweitert, etwa um leistungsstarke Elektronen- oder gar Rastertunnelmikroskope, die noch viel kleinere Strukturen bis hin zu einzelnen Atomen „sichtbar“ machen, und so weiter? Letztlich – und das ist der springende Punkt – ist die Grenzziehung zwischen den Ebenen der f- und der nicht-gesetzesartigen s-objects willkürlich und, wenn überhaupt, dann eher eine Frage der technischen Realisierbarkeit von Beobachtungsverfahren, weniger die verschiedener Realitäten oder sinnvoll zu unterscheidender Realitätskonzepte. Wenn es aber keinen Grund für die Unterscheidung von f- und s-objects gibt, so kann es auch keinen Grund für die Annahme geben, die einen würden mit Hilfe der anderen konstituiert, ganz gleich in welcher Weise dies geschehen soll.

Eine Unterscheidung zwischen f- und s-objects im Kailaschen Sinne wäre allenfalls zwischen gesetzesartigen und nicht-gesetzesartigen Entitäten sinnvoll. Die Gesetze der Newtonschen Mechanik oder die Schrödingergleichung wären dann s-objects, weil sie keine konkreten Gegenstände wie Planeten oder Photonen (in diesem Fall also f-objects), sondern lediglich deren Verhalten abstrakt und in allgemeiner Form beschreiben. Das entspräche auch dem, was Kaila in *Über den physikalischen Realitätsbegriff* zur Entdeckung von Gesetzen und der damit einhergehenden Generalisierung schreibt:

Was dieses Beispiel<sup>22</sup> lehrt, gilt für alle Fälle, in denen die Entdeckung des allgemeinen Gesetzes eines Bereiches gelingt. Denn in demselben sind ja die diskreten Werte der Einzelbeobachtungen durch einen Wertverlauf gewisser Variablen ersetzt worden; eine Interpolation und Extrapolation, die weit über das bisher bekannte hinausführen, ist dadurch vorgenommen worden. Das Suchen nach den höheren

Invarianzen führt dazu, dass Konstanten fortlaufend durch Variablen ersetzt werden, deren Werte durch gewisse Funktionen bestimmt sind – wie z.B. die Galileische Beschleunigungskonstante  $g$  in der Newtonschen Mechanik durch die Gravitationsvariable  $P$ , deren Werte Funktionen von Massen und Abständen sind, ersetzt wird. (Kaila 1941, S. 46 f.)

Kaila spricht hier eindeutig von gesetzesartigen s-objects. Aber auch in diesem Bereich tritt ein Problem auf: unter den so gewonnenen s-objects gibt es allgemeine und weniger allgemeine Gesetze und Theorien. Die Newtonsche Mechanik etwa geht inklusive ihrer Gesetze in die Einsteinsche Relativitätstheorie als Spezialfall ein. Wenn nun gefordert ist, dass die Gesetze beider Theorien als s-objects gelten, so muss innerhalb dieser Menge abermals differenziert werden.

Trotz dieser Probleme von Kailas „system of the concepts of reality“ soll die Kritik daran nicht zu weit getrieben werden. Dem Grundsatz nach ist seine Idee, dass es – aus epistemologischer Perspektive – (Realitäts-)Konzepte mit größerer, andere mit geringerer Invarianz gibt, sicher richtig. Lediglich die Art und Weise der Konstitution dieser Konzepte und ihre Unterteilung in ausgerechnet drei Realitätsebenen scheint mir aus den genannten Gründen ein wenig aus der Luft gegriffen, zumindest für den Bereich der f- und s-objects. Nichts desto trotz gibt es in den Naturwissenschaften – gerade in der Physik – ohne Zweifel theoretische Entitäten, die in unserer Alltagserfahrung nicht auftauchen und in diesem Sinne rein wissenschaftlich sind. Darunter fallen insbesondere theoretisch formulierte Naturgesetze, aber auch – unter Vorbehalt der oben geäußerten Kritik – theoretisch etablierte, nicht-gesetzesartige Gegenstände wie Felder oder Elementarteilchen. Diese sollen, weil sie ohnehin fast ausschließlich innerhalb physikalischer Theorien gebraucht werden, auch im Folgenden „s-objects“ genannt werden.

Als (rein) theoretische Entitäten ist es den s-objects zu eigen, dass sie nicht von den gegebenen Wahrnehmungsdaten abgelesen werden und dementsprechend nicht aus  $\phi$ -objects konstituiert werden können. In diesem Sinne verfügen sie nicht bloß über größere Invarianz, sondern stellen auch Idealisierungen und Generalisierungen tatsächlich beobachteter Gegenstände und Phänomene dar. Dazu Neuber:

[...] for Kaila the search for higher invariances is intimately bound up with the process of idealization. According to Kaila, s-level objects cannot be read off directly from the given sensory basis. Rather, s-objects, like the mass points of classical mechanics or theoretical entities of modern microphysics, are constructed by a complicated procedure of smoothing, simplifying and even fictionalizing certain features of the objects in question. Nevertheless, s-objects are not thereby rendered any less relevant. (Neuber 2012, S. 8.)

Diese Feststellung trifft ganz besonders auf die gesetzesartigen s-objects zu. Naturgesetze sind keine konkreten Gegenstände der Alltagswelt. Sie liegen nicht auf Laborbänken herum. Ebenso wenig werden sie in Teilchenbeschleunigern erzeugt. Sie sind *mathematisierte* und *generalisierte* Beschreibungen<sup>23</sup> tatsächlich beobachteter Phänomene und als solche natürlich nicht bloß hochgradig invariant, sondern auch und vor allem *nicht direkt beobachtbar*.

Die Idealisierung und Generalisierung theoretischer Entitäten und die damit einhergehende Unbeobachtbarkeit derselben hat zur Folge, dass die oben genannte These 2 des Logischen Empirismus – „In order to count as scientific, statements must, in principle, be testable.“ – abgeschwächt werden muss – wenigstens dann, wenn jene Aussagen weiterhin als wissenschaftlich und von der realen Welt handelnd gelten, die dort behaupteten Entitäten selbst als *real* betrachtet werden sollen. Gerade das ist ja die Kernthese von Kailas non-linguistic, *realist account of logical empiricism*. Im dritten Kapitel *Die Idealisierung* von *Über den physikalischen Realitätsbegriff* schreibt er gleich im dritten Absatz:

Wenn wir jedoch [...] zu den „mathematisierenden“ Theorien übergehen, wird das Verhältnis zwischen Theorie und Erfahrung wegen eines Verfahrens kompliziert, das in jeder, auch der einfachsten „mathematisierenden“ Theorie enthalten ist, wegen der *Idealisierung*. Dieses Verfahren hat zur Folge, dass die strenge Prüfbarkeit durch eine „gelockerte“ oder „abgeschwächte“ Prüfbarkeit ersetzt werden muss ungefähr in gleichem Sinne wie die strenge Entscheidbarkeit durch eine „gelockerte“ oder „abgeschwächte“ Entscheidbarkeit ersetzt wurde. (Kaila 1941, S. 60.)

Diese Forderung ist nicht weiter verwunderlich. *Mathematisierte* Theorien treffen *generalisierte* Aussagen über *idealisiert* beschriebene Entitäten, und damit gerade nicht über direkt beobachtbare Phänomene der Alltagswelt. Das heißt aber nicht, dass diese Theorien und Entitäten nichts mit der Realität zu tun hätten, sondern bloß, dass die so

beschriebene Realität uns nicht *unmittelbar* zugänglich ist. Wie oben bereits angedeutet gibt es jedoch ein Werkzeug, vermittels dessen auch Hypothesen über diesen Bereich der Realität durchaus überprüfbar werden: *Hilfshypothesen*. Sie geben an, was wir im Experiment beobachten sollten. Beobachten wir trotz korrekter Durchführung des Experiments etwas anderes, so gilt die entsprechende Hypothese als falsifiziert.<sup>24</sup>

Hier deutet sich abermals die zentrale Rolle des Konzepts der Messung, sowohl in Kailas Konstitutionssystem als auch in der wissenschaftlichen Praxis, an. Im folgenden Abschnitt soll dieses Konzept noch etwas näher beleuchtet werden, bevor wir uns dann der Darstellung und Einordnung des Metrologischen Strukturrealismus widmen.

### 2.2.3 Messung

Wenn wir es, wie im letzten Abschnitt beschrieben, mit mathematisierten Theorien zu tun haben, treten Gleichungen oder Gleichungssystemen auf, die das Verhältnis mindestens zweier Terme, die als Konstante oder Variable vorkommen können, beschreiben. Ein einfaches Beispiel hierfür ist die Formalisierung des zweiten Newtonschen Gesetzes:

$\vec{F} = m\vec{a}$ . Diese Gleichung setzt die Änderung der Bewegung – also die Beschleunigung – einer Masse zu der auf dieselbe wirkenden Kraft in Relation. Bei der Betrachtung der Gleichung wird deutlich, dass – bei konstanter Masse – mit einer größeren Kraft auch eine größere Beschleunigung einhergeht, oder dass für dieselbe Beschleunigung bei einer größeren Masse eine größere Kraft wirken muss. Die Terme der Gleichung sind Variable. Sie beschreibt also nicht bloß eine einzelne Beobachtung – etwa: „Um eine Masse von 2,3 Kilogramm um 4,2 Meter pro Sekunde zum Quadrat zu beschleunigen, muss eine Kraft von 9,66 Newton aufgebracht werden“ – sondern jede mögliche Beobachtung des wechselseitigen Verhältnisses von Kraft, Masse und Beschleunigung *gleichzeitig*. Hier drängt sich die Frage auf, wie es zur Aufstellung solcher Gleichungen kommt. Kaila stellt in seiner *Theorie des Messens*<sup>25</sup> zwei mögliche Sichtweisen in den Raum, die Neuber wie folgt zusammenfasst:

Here, Kaila points out that two opposite views can be identified: conventionalism or positivism, on the one hand, and empiricism, or realism, on the other. Wherein lies the difference? According to Kaila, the conventionalist view implies that measurement consists in the mere imposition of numerals onto phenomena, whereas the empiricist account initially claims that the correlation between phenomena and

numerals must be discovered by executing measurements. [...] The conventionalist consequently aims at a convention-based economical description of measurable data, while the empiricist is looking for invariant and, at the same time, quantitatively expressible relationships among such data. The decisive contrast, then, is to be found between economy, on the one hand, and invariance, on the other. (Neuber 2012, S. 10.)

Auf die Unterschiede dieser beiden Positionen kann hier nicht im Detail eingegangen werden. Von besonderer Bedeutung ist für uns allerdings, dass, aus Kailas Sicht, Gleichungen und Theorien nicht bloß adäquate und ökonomische Beschreibungen der durch Messungen gewonnenen Daten sind, sondern auch und vor allem *invariante* Beschreibungen der Relationen dieser Daten zueinander. Gerade hierdurch zeichnen sich *generalisierte*, insbesondere aber auch *mathematisierte* Theorien aus.

Der Messung kommt dabei gleich in zweifacher Hinsicht eine entscheidende Rolle zu. Zum einen ist sie eine Tätigkeit, durch die das Aufstellen von Theorien und Gleichungen ermöglicht wird.<sup>26</sup> Dazu werden Messreihen durchgeführt, bei denen lediglich eine Variable verändert und die Änderung der abhängigen Variablen gemessen wird. Theoretisch lassen sich solche Messreihen beliebig genau und mit beliebig kleinen Unterschieden zwischen den Werten der veränderten Variablen durchführen. In der praktischen Durchführung ist dem freilich eine Grenze gesetzt, nicht zuletzt dadurch, dass eine Messreihe, die in einem gegebenen Wertebereich stattfindet, mit immer kleineren Differenzen zwischen den Werten der veränderten Variablen immer länger dauert. Dementsprechend ergibt sich in praxi kein Kontinuum an Zuordnungen zwischen Präparationen und Messergebnissen, sondern eine Reihe diskreter Einzelzuordnungen. Um nun von diesen Einzelergebnissen zu einem Kontinuum – welches in einer Gleichung wie der oben genannten ja zum Ausdruck kommt – zu gelangen, bedarf es eines *generalisierenden* Verfahrens: der Interpolation.

Ebenso kann der Wertebereich einer Messung nicht beliebig nach allen Seiten hin ausgedehnt werden. So können etwa weder beliebig kleine, noch beliebig große Kräfte experimentell erzeugt werden. Das ist aber auch nicht nötig. Liegen die Werte für einen hinreichend großen Bereich hinreichend genau fest, so kann von diesen extrapoliert – also auf die potentiellen Ergebnisse einer Messung außerhalb des tatsächlich überprüften Wertebereichs – geschlossen werden. Das ist es, was Kaila meint, wenn er schreibt:

[I]n the law, the discrete values of the individual observations have been replaced by a continuous range of values of certain variables; an *interpolation* and *extrapolation* which goes far beyond what was previously known has thus been accomplished. (Kaila 1979b [1942], S. 154. Hervorhebungen von mir.)

Was sich schon im Begriff der *Generalisierung* andeutet, kommt in den Konzepten der *Interpolation* und *Extrapolation* konkret zum Ausdruck: die Messung ist sicherlich notwendig, alleine aber keinesfalls hinreichend für die Entwicklung *generalisierter* und damit hoch *invarianter* Theorien und Gleichungen.<sup>27</sup>

Neben dieser theorienkonstituierenden Funktion der Messung spielt sie – wie bereits angedeutet – eine wichtige Rolle bei der Überprüfung mathematisierter Theorien und ihrer Gleichungen. Soll eine Theorie überprüft werden, so muss sie Hypothesen anbieten, die auch tatsächlich mit Hilfe von Messungen *reproduzierbar* überprüft werden können. Bloße innere Konsistenz der Theorie oder die Abwesenheit von Widersprüchen zu anderen, bereits etablierten Theorien genügen nicht. Ganz im Gegenteil: Wie am Verhältnis von Quantenmechanik und Allgemeiner Relativitätstheorie schön zu sehen ist, werden gewisse Ungereimtheiten zwischen verschiedenen Theorien durchaus von der Scientific Community in Kauf genommen, solange die einzelnen Theorien einer hinreichenden empirischen Überprüfung unterzogen und in diesem Rahmen bestätigt wurden. Dagegen haben „Mittlertheorien“ wie die Stringtheorie oder die Theorie der Schleifenquantengravitation trotz ihrer vereinenden Kraft einen schweren Stand, wenn sie der geforderten Prüfbarkeitsbedingung nicht genügen. Das heißt freilich nicht, dass die genannten Ungereimtheiten auf Dauer akzeptiert werden, sondern lediglich, dass diese intertheoretischen Probleme eine geringere Rolle spielen als die empirische Bestätigung der Einzeltheorien, insbesondere dann, wenn die betreffenden Theorien unterschiedliche Phänomenbereiche beschreiben und immer wieder sehr gute Bestätigung erfahren haben.

Ebenso wie die Reproduzierbarkeit von Messergebnissen eine wichtige Forderung der Wissenschaft an sich selbst ist, ergeben sich auch ständig neue Theorien und Gleichungen aus der rein intellektuellen Fortentwicklung bereits bestehender Theorien. Ein prominentes Beispiel hierfür ist die Einsteinsche Relativitätstheorie. Eines ihrer zwei Grundprinzipien – die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum – ist zwar gewissermaßen experimentell entstanden: Es wurde einfach nie etwas Abweichendes

gemessen – selbst dann nicht, wenn die Messung einer Abweichung das ausgemachte Ziel eines Versuchs, wie etwa dem von Michelson und Morley, war.<sup>28</sup> Die sich daraus ergebenden Gleichungen aber waren zunächst rein theoretischer Natur, konnten also erst nach ihrer Aufstellung experimentell bestätigt werden.

Was die Funktion der Messung als Testinstrument für mathematisierte Theorien angeht, besteht allerdings ein Problem. Wie weiter oben schon besprochen fordert Kaila die Abschwächung der zweiten These des Logischen Empirismus. Die Forderung nach einer *strengen* Prüfbarkeit mathematisierter Theorien – so Kaila – kann nicht aufrecht erhalten werden. Sie muss „durch eine „gelockerte“ oder „abgeschwächte“ Prüfbarkeit ersetzt werden“<sup>29</sup>. Den Grund dafür expliziert Kaila wie folgt:

Die Idealisierung kompliziert nun das Verhältnis zwischen Theorie und Erfahrung. Aus einer idealisierten Theorie können wir nicht streng logisch bestimmte singuläre Erfahrungssätze ableiten, die auf eine eindeutige Weise entweder für oder wider die Theorie sprechen. Um von Idealisierungen höherer Art – wie z.B. von Massenpunkten der theoretischen Mechanik – gar nicht zu sprechen, ist dies schon dann der Fall, wenn in der betreffenden Theorie überhaupt mit bestimmten Wahrscheinlichkeitszahlen oder genauen Masszahlen operiert wird. *Wie groß darf die Differenz zwischen der berechneten und der gefundenen Zahl sein, damit man sagen könnte, die Theorie sei durch die Erfahrung bekräftigt, bzw. entkräftet?* (Kaila 1941, S. 66 f. Hervorhebung von mir.)

Kaila liefert sogleich auch die Antwort auf diese Frage:

Darüber entscheidet nicht irgendeine logisch fassbare Norm, sondern der „Wirklichkeitssinn“ oder der „wissenschaftliche Instinkt“ des Forschers. Zuweilen darf man gemäss dem Prinzip „lex de minimis non curat“ auch von beträchtlichen Differenzen absehen; zuweilen dagegen – man denke etwa an den Versuch von Michelson – können auch die geringfügigsten „minima“ die schwersten theoretischen Erschütterungen zustandebringen. Es kann sich mit der durch die Idealisierung bedingten „gelockerten“ oder „abgeschwächten“ Prüfbarkeit ebenso verhalten wie es sich mit der „gelockerten“ oder „abgeschwächten“ Entscheidbarkeit verhält: unter günstigen Umständen kann eine praktisch eindeutige Prüfbarkeit vorhanden sein. (Kaila 1941, S. 67.)

Unter weniger günstigen Umständen ist das allerdings nicht der Fall. Massenpunkte, Elektronen und so weiter – mit anderen Worten: Die nicht-gesetzesartigen s-objects – sind theoretische Entitäten, die sich zwar aus der Annahme einer Theorie ergeben, sich als solche aber unserem Zugang häufig – nicht nur im Alltag, sondern auch im Experiment – verweigern. Kaila formuliert das so:

Ein einzelner, etwa singulärer Satz einer mikrophysikalischen Theorie [...] braucht *für sich genommen* überhaupt keinen Realgehalt zu haben und als solcher überhaupt nicht prüfbar zu sein, obwohl er ein wesentlicher und unvermeidbarer Bestandteil der betreffenden Theorie sein kann. (Kaila 1941, S. 67.)

Und weiter:

Denn ein Satz wie „dies ist ein Tisch“ ist – seinem Gehalt nach und als ein Satz der Alltagsphysik – nur eine verhältnismässig einfache generalisierende Zusammenfassung gewisser Regelmässigkeiten der Erfahrung. Aber ein Satz wie „hier ist ein Elektron“ hat einen Gehalt nur im Rahmen einer weit ausgebauten, die höheren Invarianzen eines umfassenden physikalischen Erfahrungsbereichs darstellenden Theorie, die eine Reihe von kühnen *Idealisierungen* enthält. (Kaila 1941, S. 68.)

Konzepte wie beispielsweise das des Elektrons sind nach Kaila außerhalb einer entsprechenden Theorie also leer, innerhalb der Theorie aber von großer Bedeutung. Daraus folgt unter anderem, dass die Überprüfung einer Theorie nicht anhand der Beobachtbarkeit, Plausibilität oder auch nur Vorstellbarkeit ihrer Entitäten vonstatten gehen kann, sondern anhand der mit ihrer Hilfe getroffenen Vorhersagen von Messergebnissen durchgeführt werden muss. Richtige Vorhersagen nämlich zeigen, dass die gefundenen und in den Gleichungen der Theorie festgehaltenen Invarianzen tatsächlich bestehen. Kailas Position sollte hier jedoch nicht mit einem Anti-Realismus verwechselt werden. Aus der Behauptung, dass wissenschaftliche Konzepte nur innerhalb ihrer jeweiligen Theorie einen Gehalt haben, folgt nicht, dass sie keinen Bezug zur Realität haben. Die Brücke zwischen der theoretischen und der physikalischen Entität namens Elektron wird vom Erfolg der Theorie bei der Vorhersage beobachtbarer Phänomene geschlagen – man erinnere sich der oben beschriebenen Funktion der Hilfshypothesen – zusammen mit der Tatsache, dass die theoretische Entität „ein wesentlicher und unvermeidbarer Bestandteil der betreffenden Theorie“<sup>30</sup> ist.

### **3 Der Metrologische Strukturenrealismus**

Nach diesen eher historischen Betrachtungen, die uns das konzeptionelle Handwerkszeug zum Verständnis des Metrologischen Strukturenrealismus mitgeben, wollen wir uns nun demselben zuwenden. Dazu ist es nötig, zunächst einen Blick auf die beiden großen Strukturenrealismen – den Epistemischen sowie den Ontischen Strukturenrealismus – zu

werfen. Der Metrologische Strukturrealismus selbst bestimmt sich ja zunächst vor allem in der Abgrenzung zu jenen, und zwar durch die Thematisierung ihrer jeweiligen Schwächen.

Im Anschluss daran gilt es zu untersuchen, inwiefern der Metrologische Strukturrealismus in der Lage ist, *Kailas non-linguistic, realist account of logical empiricism* wie oben dargestellt für sich selbst fruchtbar zu machen. Dabei sollte er freilich mehr leisten als diejenigen Positionen, in deren Konkurrenz er tritt, sowohl im Hinblick auf epistemologische als auch auf ontologische Kriterien. Genau an diesen Stellen setzt ja auch Neubers Kritik an.

## 3.1 Positionierung und Programm des Metrologischen Strukturrealismus

### 3.1.1 Epistemischer Strukturrealismus

Auf der einen Seite finden wir den Epistemischen Strukturrealismus. Er nimmt seinen Ausgang in John Worralls Aufsatz *Structural Realism: The Best of Both Worlds?*<sup>3132</sup> und enthält in all seinen Ausformulierungen die zentrale These, unser wissenschaftlicher Zugriff auf die Welt sei epistemisch beschränkt in dem Sinne, dass wir wohl Aussagen über die strukturelle Verfasstheit der Welt<sup>33</sup> treffen können, nicht aber über die Entitäten, die diesen Strukturen zu Grunde liegen. Der ursprüngliche Beweggrund für die Entwicklung dieser Position ist das Bedürfnis, sowohl das antirealistische Argument der Pessimistischen Metainduktion, als auch das entsprechende „Gegenargument“<sup>34</sup> der wissenschaftlichen Realisten, das No-Miracles-Argument, ernst zu nehmen. Obwohl diese Argumente hinlänglich bekannt sind, sollten wir sie der Vollständigkeit halber hier kurz paraphrasieren: Das No-Miracles-Argument behauptet, dass wir unsere besten wissenschaftlichen Theorien als annähernd wahre Beschreibungen der Welt anerkennen sollten. Täten wir das nicht, müssten wir ihren Erfolg sowohl bezüglich der Vorhersage von Beobachtungen, als auch im Hinblick auf die Realisierung von technischen Anwendungen für ein Wunder halten.

Das Argument der Pessimistischen Metainduktion dagegen verweist auf den historischen Umstand, dass auch die zu ihrer jeweiligen Zeit besten Theorien immer wieder verworfen und durch neue ersetzt wurden. Ladyman (2009) nennt in diesem Zusammenhang und unter Bezugnahme auf Worrall (1989) das Beispiel der Ablösung der Fresnelschen Äthertheorie durch die Maxwellsche Theorie elektromagnetischer Felder. Beide Theorien beschreiben denselben Phänomenbereich, verwenden jedoch vollkommen unterschiedliche theoretische Entitäten zur Erklärung der Phänomene. Folglich sollte den theoretischen Entitäten mindestens einer dieser Theorien keine physikalische Realität im strengen Sinne zugesprochen werden. Dies gilt – so die Pessimistische Metainduktion – auch für alle aktuell anerkannten Theorien. Auch sie werden irgendwann durch andere Theorien abgelöst werden. Folglich kann auch ihren theoretischen Entitäten keine physikalische Realität im strengen Sinne zukommen.

Die Gültigkeit dieses metainduktiven Schlusses kann natürlich in Frage gestellt werden. Wie der Name schon andeutet, handelt es sich hier ja gerade nicht um eine streng logische Deduktion: allein auf Grund der Tatsache, dass die bisherigen Theorien inklusive ihrer Entitäten irgendwann abgelöst wurden, lässt sich nicht mit Sicherheit folgern, dass dieses Schicksal auch den aktuell anerkannten Theorien zuteil wird. Trotzdem liegt dieser Schluss – historisch betrachtet – nahe. Er ist zwar nicht zwingend gültig, es spricht jedoch vieles für und nur wenig gegen die Vermutung, dass auch die aktuellen Theorien irgendwann abgelöst werden.

Nichtsdestoweniger behält auch das No-Miracles-Argument seine Brisanz. Die Behauptung – es käme einem Wunder gleich, wenn unsere Theorien so erfolgreich seien, wie sie es eben sind und immer wieder zeigen, gleichzeitig aber nicht die Welt wenigstens näherungsweise beschrieben – wird von der Pessimistischen Metainduktion nicht angegriffen: selbstverständlich beschreiben unsere Theorien die Welt, und zwar nachweislich immer besser. Nur eben nicht in jenem naiv-realistischen Sinn, den die Pessimistische Metainduktion unterstellt. Im Rahmen des No-Miracles-Argument ist ja ausdrücklich von einer *näherungsweise* wahren Beschreibung der Welt die Rede, ein Theorienwandel also explizit mitgedacht. Dass sich Theorien ändern und abgelöst werden

ist für die Verfechter dieser Position also keineswegs so problematisch, wie das Argument der Pessimistischen Metainduktion zunächst nahezu legen scheint.

Beide Argumente scheinen also einleuchtend zu sein und sollten bei der Entwicklung einer wissenschaftstheoretischen Position dementsprechend berücksichtigt werden.

Worralls Strukturenrealismus trägt diesem Umstand Rechnung. Ladyman (2009) schreibt:

Structural realism was introduced into contemporary philosophy of science by John Worrall in 1989 as a way to break the impasse that results from taking both arguments seriously, and have the best of both worlds in the debate about scientific realism. [...] According to Worrall, we should not accept standard scientific realism, which asserts that the nature of the unobservable objects that cause the phenomena we observe is correctly described by our best theories. However, neither should we be antirealists about science. Rather, we should adopt structural realism and epistemically commit ourselves only to the *mathematical or structural content* of our theories. Since there is (says Worrall) retention of structure across theory change, structural realism both (a) avoids the force of the pessimistic meta-induction (by not committing us to belief in the theory's description of the furniture of the world) and (b) does not make the success of science (especially the novel predictions of mature physical theories) seem miraculous (by committing us to the claim that the theory's structure, over and above its empirical content, describes the world). (Ladyman 2009, 1. Introduction. Hervorhebung von mir.)

Nimmt man Ladymans Darstellung des Worrallschen Strukturenrealismus beim Wort, dann erschöpft sich das realistische Moment wissenschaftlicher Theorien in ihrem mathematischen oder strukturellen Gehalt, erstreckt sich gerade nicht auf die Entitäten, von denen diese Theorien Gebrauch machen. Im Gegensatz zu letzteren bleibe der mathematische oder strukturelle Gehalt auch über den Wandel der Theorien hinweg bestehen.<sup>35</sup> Im Sinne eines wissenschaftlichen Realismus sind diese Strukturen dann aber auch alles, worüber sinnvoll etwas gesagt werden kann. Was diesen Strukturen zu Grunde liegt, ihre ontologische Basis, bleibt epistemisch unzugänglich.

Diese Form des Strukturenrealismus genügt Neuber nicht; er kritisiert sie als ontologisch zu schwach. Der Epistemische Strukturenrealismus – so Neuber – läuft Gefahr, auf nichts weiter als eine Ausprägung des Instrumentalismus zusammenzufallen, wenn er den eigentlichen Gehalt einer Theorie auf ihre mathematischen Strukturen beschränkt und diese wiederum mit ihren mathematischen Gleichungen identifiziert. Es ist jedoch nicht klar, welcher Zusammenhang zwischen den mathematischen Gleichungen einer Theorie

einerseits und der objektiven Struktur der physikalischen Welt andererseits besteht. Dementsprechend begnügt sich der Instrumentalist auch damit, jene Gleichungen als bloße Hilfsmittel zur Systematisierung von Beobachtungsdaten zu betrachten. Beschränkt sich nun aber der Epistemische Strukturenrealismus auf die Anerkennung bloß dieser Gleichungen als ausschließlichen Gehalt einer Theorie, so kann er in der Folge keine Aussagen treffen, die über einen Instrumentalismus hinausgehen. Dann ist er aber auch kein wissenschaftlicher Realismus mehr.<sup>36</sup>

Insofern man dem Epistemischen Strukturenrealismus genau diese Identifikation von Struktur und mathematischer Gleichung unterstellen kann, ist Neubers Beobachtung beizupflichten. Ob diese Identifikation allerdings in jeder Ausformulierung des Epistemischen Strukturenrealismus zum Tragen kommt, darüber kann hier kein abschließendes Urteil gefällt werden. Man könnte ja durchaus Strukturen in einer Theorie identifizieren, die keine mathematischen Gleichungen sind. Das gilt insbesondere dann, wenn der Epistemische Strukturenrealismus auch diejenigen Theorien umfassen soll, die überhaupt keine mathematischen Gleichungen enthalten, entweder, weil sie sie nicht benötigen, oder weil sie vorläufig rein qualitativ formuliert sind.<sup>37</sup> Worralls Strukturenrealismus jedoch handelt vor allem von mathematischen beziehungsweise mathematisierten Theorien, dementsprechend kommt hier die Identifikation von Struktur und Gleichung und damit auch Neubers Einwand zum Tragen. Für den Fortgang dieses Aufsatzes sollten wir diese Identifikation – des Argumentes wegen und aus dem in der letzten Fußnote genannten Grund – als symptomatisch für jede Form des Epistemischen Strukturenrealismus annehmen, jedoch nicht, ohne gewisse Zweifel bezüglich der Richtigkeit dieser Annahme betont zu haben. Womöglich lässt sich der Epistemische Strukturenrealismus so erweitern – oder ist bereits so erweitert worden – dass das Argument von seiner ontologischen Schwäche an Gewicht einbüßt.<sup>38</sup>

### **3.1.2 Ontischer Strukturenrealismus**

Eben haben wir das Argument der ontologischen Schwäche angesprochen, das auch Neuber gegen den Epistemischen Strukturenrealismus – in seiner einfachen Form – stark macht. Der Ontische Strukturenrealismus jedoch ist in der Lage, sich gegen dieses Argument zu immunisieren, indem er die Position des Epistemischen Strukturerealismus

in gewisser Weise radikalisiert. Er behauptet nicht nur, dass die in naturwissenschaftlichen Theorien gebrauchten und über deren Wandel hinweg erhaltenen Strukturen das Einzige sind, das uns epistemisch zugänglich ist, sondern dass es sie darüber hinaus tatsächlich in der Welt gibt. Und mehr noch: diese Strukturen sollen in der Tat *das Einzige sein, das es in der Welt gibt*. Damit ist der Ontische Strukturenrealismus nicht nur eine Erweiterung des Epistemischen Strukturenrealismus im oben angesprochenen Sinne, sondern eine harte, ontologische Position, die in dieser Form freilich nicht unumstritten sein kann. Ladyman (2009) kondensiert den Unterschied zwischen Epistemischem und Ontischem Strukturenrealismus auf folgende Aussage:

A crude statement of ESR is the claim that all we know is the structure of the relations between things and not the things themselves, and a corresponding crude statement of OSR is the claim that there are no things and that structure is all there is (this is called radical structuralism by van Fraassen 2006). (Ladyman 2009, 4. Ontic Structural Realism (OSR).)

Dies ist – das betont Ladyman selbst gleich zweifach – freilich eine recht grobe Darstellung der beiden Positionen. Ich halte sie in dieser Form jedoch für nützlich, und zwar um auf einen wichtigen Punkt hinzuweisen, der bei einschlägigen Diskussionen um die Strukturenrealismen immer wieder eine große Rolle spielt und an dem Neubers Kritik des Ontischen Strukturenrealismus unter anderem ansetzt. Dieser impliziert nämlich, wenn man Ladymans Darstellung folgt, das Konzept der *Relationen ohne Relata*. Neuber schreibt dazu:

In the case of OSR, however, the problem lies in the resulting, and downright unintuitive, conception of relations without relata. The possibility to conceptualize relations without thereby attaching to them individual objects situated within those relations remains somewhat of an enigma. Moreover, what is completely unclear is how such an essentially metaphysical conception is to be justified in terms of epistemic access. (Neuber 2012, S. 19 f.)

Selbstverständlich weiß Neuber um die Tatsache, dass es alternative Formulierungen des Ontischen Strukturenrealismus gibt, die ohne das Konzept der Relationen ohne Relata auskommen, oder sie zumindest nicht zwingend erforderlich machen. Neuber recurriert<sup>39</sup> auf eine Position, die bei Ladyman unter dem Titel „Eliminativism“ firmiert: „there are no individuals (but there is relational structure)“.<sup>40</sup> Es gebe, so Ladyman und Neuber, wenigstens zwei Möglichkeiten, Relationen ohne Relata im strengen Sinn – das heißt: *mit*

*Relata*, aber *ohne Individuen* – zu konstruieren.<sup>41</sup> Eine dieser Möglichkeiten bestehe darin, dass die *Relata* der Relationen selbst auch Relationen sind, deren *Relata* wiederum Relationen sind und so weiter. Diese Option charakterisieren Neuber und Ladyman mit der Formulierung „structure all the way down“ (bei Neuber) beziehungsweise „relations all the way down“ (bei Ladyman) und zumindest Neuber hält sie epistemisch nicht für ausgeschlossen. Es könne aber auch sein, dass Relationen ohne *Relata* nicht-instantiierte Universalien sind, beispielsweise im Falle der Relation „größer als“. Ladyman:

For example, when we refer to the relation referred to by larger than, it is because we have an interest in its formal properties that are independent of the contingencies of its instantiation. To say that all that there is are relations and no *relata*, is perhaps to follow Plato and say that the world of appearances is not properly thought of as part of the content of knowledge. (Ladyman 2009, 4. Ontic Structural Realism (OSR).)

Diese Möglichkeit lehnt Neuber jedoch – wie ich finde zu Recht – ab: „[...] this is too much metaphysics, both for logical empiricists and for philosophers of science in general.“<sup>42</sup> Solche Relationen wären in der Tat, insofern sie dem Reich der platonischen Ideen angehören, ohnehin epistemisch unzugänglich und damit für jede ernstzunehmende Form des wissenschaftlichen Realismus irrelevant.

Im Hinblick auf den wissenschaftlichen Realismus – und ein solcher will der Ontische Strukturenrealismus ja sein – ergibt sich aber auch für die erste Möglichkeit, nämlich die, die oben mit „structure all the way down“ charakterisiert wurde, ein Problem: sie besteht spätestens dann nicht mehr, wenn wir Individuen finden, die selbst nicht wieder ausschließlich relational bestimmt sind. Aber auch wenn wir solche Individuen nicht finden, sondern immer bloß neue Strukturen, bleibt die Frage offen, ob sich hieraus nicht entweder (a) eine physikalische Form des infiniten Regress ergibt, was zu einer Ontologie mit unendlich vielen, aber physikalisch realen Relationen führen würde<sup>43</sup>, oder ob sich womöglich (b) eine Art physikalische Zirkularität ergibt, die nicht nur, aber auch und besonders, epistemische Probleme aufwerfen würde, beispielsweise die Frage, von welcher *physikalischen* Relation als erste Erkenntnisquelle ausgegangen wird, und wie die Wahl genau dieser Relation als grundlegende zu rechtfertigen sei.<sup>44</sup>

Problem (a) ist freilich nur dann ein echtes Problem, wenn wir davon ausgehen, dass die physikalische Welt endlich ist, das heißt, keine unendlich große Ontologie aufweist.

Diese Frage kann im Rahmen dieser Arbeit natürlich nicht beantwortet werden, und eine rein metaphysische Spekulation ohne Blick auf Physik und Kosmologie wäre im Rahmen eines wissenschaftlichen Realismus unangebracht. Dementsprechend wollen wir diesen Ansatz hier nicht weiter verfolgen, sondern lediglich auf ein mögliches Problem hinweisen.

Bei der Betrachtung von Problem (b) werden wir an Carnaps *Der Logische Aufbau der Welt*<sup>45</sup> erinnert, wo uns die Wahl der Ausgangsbasis und der grundlegenden Relation unseres epistemischen Zugangs freigestellt und dadurch die *begriffliche* Konstitution der Welt ja erst ermöglicht wird. Im Falle von Carnaps Konstitutionssystem haben wir diese Wahlmöglichkeit tatsächlich, da es sich hier um ein logisch-begriffliches System handelt. Andererseits verhindert sie aber – sowohl bei Carnaps *Aufbau* als auch im Fall des hier geschilderten Problems – von einer *realistischen* Position zu sprechen.<sup>46</sup> Hier ist nämlich weder die epistemische, noch die ontologische Grundlage für Erkenntnis und Konstitution der physikalischen Welt geklärt. Je nach Wahl der Ausgangsrelation ergeben sich unterschiedliche Erkenntnismöglichkeiten und dementsprechend unterschiedliche Ontologien.<sup>47</sup> Im Rahmen eines wissenschaftlichen Realismus im Bezug auf die Physik gehen wir aber von der Existenz einer einzigen Realität mit genau einer Ontologie aus, die wir mit unseren Theorien möglichst gut abzubilden versuchen. Täten wir das nicht, könnten wir unsere Versuche, die Allgemeine Relativitätstheorie und die Quantenmechanik miteinander zu vereinbaren, gerade so gut sein lassen. Wenn wir verschiedene Ontologien gleichberechtigt zulassen, also auch keine als fundamental auszeichnen, brauchen uns auch eventuelle Ungereimtheiten zwischen gut bestätigten Theorien nicht zu stören. Da der Ontische Strukturenrealismus aber, wie gesagt, ein wissenschaftlicher Realismus sein will, kann er dieses Problem nicht ignorieren.

Es gibt andere Autoren, wie etwa Michael Esfeld, die eine weitere Spielart des Ontischen Strukturenrealismus vertreten. Dort gibt es zwar echte Relata im strengen Sinne, jedoch haben diese keine intrinsischen Eigenschaften. Folglich sind sie nur durch die Relationen bestimmt, in denen sie stehen, haben mithin kein ontologisches Primat vor diesen. Dazu Esfeld:

It seems that (a) relations require relata, that is, things which stand in the relations, and that (b) these things have to be something in themselves, that is, must have intrinsic properties over and above the relations in which they stand. However, a metaphysics of relations merely has to reject the second part of this claim: one can maintain that (a) relations require relata, that is, things which stand in the relations, but that (b\*) these things do not have any intrinsic properties that underlie the relations in which they stand. (Esfeld 2004, S. 2.)

Diese Position ergibt sich bei Esfeld aus der Betrachtung eines besonderen Phänomens der Quantenmechanik: der Verschränkung. Quantenmechanisch verschränkte Systeme zeichnen sich insbesondere durch die Eigenschaft der Nichtseparabilität aus. Kurz zusammengefasst bedeutet das, dass der quantenmechanische Zustand eines Teilsystems in einem zusammengesetzten System nicht unabhängig vom Zustand der anderen Teilsysteme vorliegt, dass also der Zustand jedes Teilsystems durch den Zustand des Gesamtsystems bestimmt ist. Esfeld formuliert das so:

The states of two or more systems are non-separable if and only if it is only the joint state of the whole that completely determines the state-dependent properties of each system and the correlations among these systems (to the extent that these are determined at all). (Esfeld 2004, S. 7.)

Durch die Annahme dieser Position gelingt es Esfeld, die oben genannten Schwierigkeiten, die sich aus der Annahme von Relationen ohne (echte) Relata ergeben, zu umgehen. Insbesondere die Möglichkeiten – und damit die Probleme – eines physikalischen infiniten Regresses (*Structure aaall the way dooown*) oder einer physikalischen Zirkularität (*Structure aaall the way round*) kommen so nicht auf, denn es gibt hier Relata, deren Eigenschaften zwar ausschließlich relational bestimmt sind, die aber dennoch als echte Relata vorliegen. Der Regress beziehungsweise die Zirkularität beginnen erst gar nicht, da diese Relationen – gemeinsam mit ihren Relata – als fundamental betrachtet werden. Es ist also unnötig, auf der Suche nach der grundlegenden Relation immer noch einen Schritt weiter und so entweder unendlich lange oder immer im Kreis zu gehen.

Die Feinheiten dieser Position können hier nicht weiter diskutiert werden. Dennoch sollte sie nicht unerwähnt bleiben, da sie ein gelungenes Beispiel für eine Wissenschaftsphilosophie ist, die sich maßgeblich an den aktuellen physikalischen Theorien orientiert. Quantenmechanische Verschränkung ist ein tatsächlich beobachtetes

Phänomen, keine rein metaphysische Spekulation, die sich lediglich an unseren Intuitionen misst, die wir aus der alltäglich erfahrbaren, klassischen Welt mitbringen.

### 3.1.3 Metrologischer Strukturenrealismus

In den letzten beiden Abschnitten haben wir uns einigermaßen ausführlich – und dennoch in verkürzender Art und Weise – mit dem Epistemischen und dem Ontischen Strukturenrealismus beschäftigt. In der Tat offenbaren beide in ihrer einfachsten und basalsten Form jene Probleme, die Neuber benennt. Wie oben gezeigt wurde, gibt es allerdings durchaus Möglichkeiten, den Epistemischen sowie den Ontischen Strukturenrealismus so zu erweitern, dass es nicht mehr unbedingt nötig ist, diese Positionen hinter sich zu lassen. Ersterer kann ontologisch stärker aufgefasst werden als es zunächst scheint, letzterer hat in der ein oder anderen Ausformulierung womöglich nicht mit so großen epistemologischen Problemen zu kämpfen wie ursprünglich gedacht.

Bei genauerer Betrachtung zeigt sich aber, dass dadurch der Entwicklung des Metrologischen Strukturenrealismus keinesfalls die berechtigende Grundlage entzogen wird. Obgleich es durchaus möglich scheint, die Unzulänglichkeiten der bisherigen Strukturenrealismen durch alternative Formulierungen anzugehen oder sogar zu beseitigen, ist dadurch noch nicht sichergestellt, dass sie dann auch jeweils die Vorteile des anderen integrieren können. Es ist ja Neubers erklärtes Ziel, „the best of both structural worlds“ zu vereinen, wenn man so will also die eine Spielart des Strukturenrealismus mit Hilfe der Vorteile der anderen zu erweitern und umgekehrt.

Es gibt darüber hinaus aber noch eine wichtige Eigenheit des Metrologischen Strukturenrealismus, die allen bisherigen Strukturenrealismen abgeht: das ist die Anerkennung und Hervorhebung der Funktion der Messung bei der Entwicklung einer realistischen Position bezüglich der Wissenschaften. Dazu Neuber:

The pivotal idea is that insight into the invariance-constituting function of measurement provides the connecting link between the ontological and the epistemological component of a structural realist account of science and nature. [...] In view of OSR, I am led to assume that the structures themselves exist independently of their being quantitatively captured. However, ESR demonstrates the fundamental importance of epistemic access. At this point, I argue that the analysis provided by Kaila invests us with an epistemologically equally transparent, but ontologically significantly stronger conception. The invariant

systems of relations themselves are, in fact, epistemically accessible by carrying out measurements. Consequently, one may claim that MSR combines the epistemological transparency of ESR with the ontological explicitness of OSR. (Neuber 2012, S. 20.)

In der bisherigen Darstellung haben wir uns auf die Motivation des Metrologischen Strukturrealismus konzentriert, also darauf, zu zeigen, warum es sinnvoll scheint eine solche Position zu entwickeln, wo sie im Reigen der bestehenden Positionen einzuordnen ist und welche Vorteile sie im Vergleich zu den anderen Strukturrealisten mit sich bringt. Die positive Ausformulierung seiner Position bleibt Neuber zu weiten Teilen schuldig. Aus dem oben angeführten Zitat können wir jedoch die zentrale Idee von Neubers Konzept herauslesen, nämlich „[...] that insight into the invariance-constituting function of measurement provides the connecting link between the ontological and the epistemological component of a structural realist account of science and nature.”

Dementsprechend stellt sich nun die Frage, was – gemäß dieser zentralen Idee und im Hinblick auf die Invarianzkonstituierende Funktion der Messung – vom Metrologischen Strukturrealismus gefordert ist. Im Folgenden sollen drei wesentliche Punkte formuliert und anschließend begründet werden. Zunächst die Formulierung der Forderungen:

- 1 Den Strukturen beziehungsweise Relationen (inklusive deren Relata), *die in naturwissenschaftlichen Theorien auftreten*, soll Realität im Sinne von „tatsächlich oder näherungsweise in der Welt objektiv vorhanden sein“ zukommen. (*Ontologische Forderung*)<sup>48</sup>
- 2 Die Strukturen beziehungsweise Relationen (inklusive deren Relata), *die in der Welt vorhanden sind*, sollen epistemisch zugänglich sein. (*Epistemologische Forderung*)<sup>49</sup>
- 3 Die Messung soll in ihrer Invarianzkonstituierenden Funktion das verbindende Element zwischen der *Ontologischen Forderung* und der *Epistemologischen Forderung* sein. (*Metrologische Forderung*)<sup>50</sup>

Die *Ontologische Forderung* ergibt sich aus dem Umstand, dass der Metrologische Strukturrealismus eine wissenschaftlich-*realistische* Position sein soll.

Dementsprechend müssen die Relationen und Relata der Theorien, die er umfasst, auch

als real vorhanden aufgefasst werden, wenigstens näherungsweise. Diese Forderung entspricht dem oben explizierten No-Miracles-Argument und ist in jedem wissenschaftlichen Realismus enthalten – gerade deshalb hat der Epistemische Strukturrealismus in seiner einfachen Ausprägung ja mit dem Problem zu kämpfen, dass er womöglich kein echter Realismus sondern vielmehr ein Instrumentalismus ist. Für die prinzipielle Annahme eines wie auch immer gearteten wissenschaftlichen Realismus wird an dieser Stelle nicht und in der gesamten Arbeit so gut wie nicht argumentiert. Sie wird als Grundlage vorausgesetzt, ohne die es freilich keinen Sinn ergibt, eine besondere Spielart des wissenschaftlichen Realismus zu entwickeln.<sup>51</sup>

Die *Epistemologische Forderung* ist Ausdruck der Tatsache, dass der Metrologische Strukturrealismus eine *wissenschaftlich*-realistische Position sein soll. Über prinzipiell Unzugängliches kann – wenigstens im *wissenschaftlichen* Kontext – nichts gesagt werden. Das prinzipiell Unzugängliche ist, ob existent oder nicht, ja per definitionem völlig ohne Wirkung, hat keinerlei Einfluss auf das prinzipiell Zugängliche. Wenn es ihn doch hätte, wäre es nicht prinzipiell unzugänglich, denn seine Existenz könnte an seiner Wirkung auf das prinzipiell Zugängliche erkannt werden. Folglich wäre es selbst nicht mehr prinzipiell unzugänglich, sondern zugänglich.<sup>52</sup> Es ist also nicht nur die Existenz des prinzipiell Unzugänglichen hochgradig zweifelhaft, sondern sein tatsächlicher ontologischer Status auch völlig unerheblich. Als sinnvoller Fluchtpunkt unseres wissenschaftlichen Erkenntnistrebens bleibt nur das prinzipiell Zugängliche. Aus diesem Grund ist, wie oben schon angedeutet, auch die Konzeption eines Ontischen Strukturrealismus mit Relationen ohne Relata im Sinne nicht-instantiierter Universalien als wissenschaftlicher Realismus völlig unbrauchbar.

Die *Metrologische Forderung* nun ist das eigentlich neue am Metrologischen Strukturrealismus. Sie soll die Brücke schlagen zwischen der *Ontologischen Forderung* einerseits und der *Epistemologischen Forderung* andererseits, und zwar mit Hilfe der Messung und ihrer invarianzkonstituierenden Funktion. Wie die Messung das leisten kann ist leicht ersichtlich: sie ist im Prinzip nichts anderes als die Beeinflussung des Zustands eines messenden Systems – für gewöhnlich ein Messgerät – durch den Zustand eines anderen, zu messenden Systems, so dass der Zustand des zu messenden

Systems einem bestimmten Zustand des messenden Systems korreliert.<sup>53</sup> Daher ist, wenn etwas messbar ist, auch seine prinzipielle Zugänglichkeit gegeben. Da aber der Zustand des messenden Systems eine objektive Größe hoher Invarianz ist und mit dem Zustand des zu messenden Systems korreliert, ist auch der Zustand des letzteren in hohem Maße objektiv und damit real.

Hier finden wir einen Anknüpfungspunkt zu Kaila. Es gilt zu überprüfen, ob sein *non-linguistic, realist account of logical empiricism* für die Erfüllung der eben explizierten Forderungen fruchtbar gemacht werden kann. Die Idee der invarianzkonstituierenden Funktion der Messung geht ja auf diese Position zurück, und soll – insbesondere für die dritte Forderung – eine zentrale Rolle spielen.

Betrachten wir im Hinblick auf diese Überprüfung zunächst noch einmal die *Ontologische Forderung*. Als wissenschaftlich-*realistische* Forderung verlangt sie, dass den in naturwissenschaftlichen Theorien auftretenden Strukturen und Relationen Realität im Sinne von „tatsächlich oder näherungsweise in der Welt objektiv vorhanden sein“ zukommen soll. Kailas Position erfüllt diese Forderung vollumfänglich: theoretischen Strukturen kann mit Kaila der Status des real Vorhandenseins gerade deshalb zugesprochen werden, weil sie als Ergebnis generalisierender und abstrahierender Prozesse größere Invarianz – und damit größere Objektivität – aufweisen als Konzepte der Alltagswelt (f-objects) oder der phänomenalen Erfahrung ( $\phi$ -objects). Die hier genannten Prozesse bestehen in der Interpolation und Extrapolation der in Messreihen gewonnenen Daten. Während beispielsweise die Messwerte eines Experiments als Anzeigewerte eines Zeigers oder Displays des Messinstruments in den Bereich der f-objects gehören und als solche aus  $\phi$ -objects gewonnen werden, ergibt sich aus den generalisierenden Verfahren der Interpolation und Extrapolation in Anwendung auf diese Messwerte ein allgemeines Gesetz in Form einer mathematischen Gleichung, die die möglichen Messdaten relational zueinander ins Verhältnis setzt. Gleichzeitig geht diese Formulierung der Realität als Gleichung über die Möglichkeiten tatsächlich durchführbarer Messungen hinaus, ist mithin nicht allein abhängig von der rein technischen Erfassung von Messdaten. Sie gehört folglich zum Bereich der s-objects und ist damit Teil der objektiv beschreibbaren, also realen Welt.<sup>54</sup>

Kommen wir abermals auf die *Epistemologische Forderung* zu sprechen. Nach ihr sollen die Strukturen und Relationen wissenschaftlicher Theorien nicht nur real vorhanden, sondern auch zugänglich sein. Dass wir uns im Rahmen des wissenschaftlichen Erkenntnisstrebens ohnehin nur mit prinzipiell Zugänglichem befassen können, wurde bereits erläutert. Wir müssen uns aber fragen, ob Kailas Konzeption die Möglichkeit des epistemischen Zugriffs auf die prinzipiell zugänglichen Relationen und Relata der Welt überhaupt umfasst. Hier lautet die Antwort: ja, aber mit einer Einschränkung. Die Möglichkeit des epistemischen Zugriffs im wissenschaftlichen Sinn besteht in der und durch die Messung. Sie ist – dank ihrer invarianzkonstituierenden Funktion – die *wissenschaftlich-realistische Methode* des Zugriffs auf die Welt: indem sie von *subjektiven* Beschreibungen der Erlebnis- oder Alltagswelt absieht, erlangt sie den Status einer *objektiven* Beschreibung. Gerade in dieser Ausklammerung des Subjektiven besteht aber die angesprochene Einschränkung. Nicht, dass es sich bei allem Subjektiven um prinzipiell Unzugängliches handeln würde – ganz im Gegenteil: im phänomenologischen Sinn ist alles Zugängliche subjektiv. Allerdings sind die Gegenstände der phänomenalen Erfahrung, also die  $\phi$ -objects, ja gerade nicht die Gegenstände naturwissenschaftlicher Theorien, sondern deren Ausgangspunkt im Bereich der sinnlichen Wahrnehmung. Sie sind notwendig für die wissenschaftliche Tätigkeit, aber nicht ihr Ziel.<sup>55</sup>

Nun noch einmal zur *Metrolologischen Forderung*. Als verbindendes Element zwischen der *Ontologischen* und der *Epistemologischen Forderung* besteht die Rolle der Messung und ihrer invarianzkonstituierenden Funktion vor allem darin, den Übergang vom subjektiv Erfahrbaren zum objektiv Realen im Kailaschen Sinne zu ermöglichen. Die Messung als objektivierende Methode erfüllt dabei gleich zwei Funktionen: Sie kann einerseits *theoriekonstituierend* wirksam werden, indem sie die notwendigen Messdaten liefert, die im nächsten Schritt auf dem Weg zur Theorie den Prozess der Generalisierung durchlaufen. Sie kann andererseits *theorieüberprüfend* wirksam werden, indem sie die aus einer generalisierten und mathematisierten Theorie abgeleiteten Aussagen mit der Wirklichkeit im Sinne der Welt der  $f$ -objects – beispielsweise dem Zeiger eines Messgeräts – vergleichbar macht. Hierbei ist freilich zu beachten, dass eine *strenge* Überprüfbarkeit nicht gefordert werden darf.<sup>56</sup> Die Messung ermöglicht damit sowohl den epistemischen Zugang zu den Strukturen der Welt, als auch die Rede von der Realität

theoretischer Strukturen. Insofern schlägt sie die Brücke zwischen Realität und Theorie, man könnte auch etwas pointierter sagen: zwischen Wirklichkeit und Wahrheit. Genau das war gefordert.

---

<sup>1</sup> Neuber 2012.

<sup>2</sup> Kaila 1941, bei Neuber 2012 in der englischen Übersetzung: *On the Concept of Reality in Physical Science. Second Contribution to Logical Empiricism*. Kaila 1979b [1942].

<sup>3</sup> An dieser Stelle sei auf Robert Nozicks Buch *Invariances – The Structure of the Objective World* hingewiesen. Dort wird dem Konzept der Invarianz sehr viel Aufmerksamkeit gewidmet, auch weit über das hinaus, was in dieser Arbeit besprochen werden kann. Nozick 2001.

<sup>4</sup> Niiniluoto 1992.

<sup>5</sup> Vgl. Carnap 1928a.

<sup>6</sup> Vgl. Reichenbach 1938.

<sup>7</sup> Vgl. Feigl 1950.

<sup>8</sup> Bei Neuber 2012 und hier zitiert nach Kaila 1979b [1942].

<sup>9</sup> Kaila 1979b [1942], S. 129.

<sup>10</sup> Kaila 1979b [1942], S. 129 f.

<sup>11</sup> Kaila 1979b [1942], S. 143.

<sup>12</sup> Vgl. Neuber 2012, S. 4 f.

<sup>13</sup> „[...] which opens the door to a realist account of science and nature.” Neuber 2012, S. 5.

<sup>14</sup> Vgl. hierzu Dawid 2013, der das Konzept der nicht-empirischen Evidenz stark macht.

<sup>15</sup> Vgl. Neuber 2012, S. 5 f.

<sup>16</sup> Neuber 2012, S. 5.

<sup>17</sup> Vgl. Kaila 1979a [1936], S. 102 und Kaila 1979b [1942], S. 152.

---

<sup>18</sup> Hier ist Vorsicht geboten. Es sollte nicht übersehen werden, dass es sich beim gemessenen Reflexionsvermögen eben nicht um die *Farbe* der Erdbeere handelt, die ja per se ein Gegenstand der individuellen Wahrnehmung ist, sondern lediglich um eine Eigenschaft, die dieser individuellen Farbwahrnehmung zugrunde liegt, sie aber – wie eben gezeigt – nicht vollständig bestimmt.

<sup>19</sup> Diese Auflistung übernehme ich von Neuber 2012, S. 7. Allerdings kehre ich die Reihenfolge der Ebenen um, um die angesprochene hierarchische Gliederung nach dem Grad der Realität auch formal darzustellen. Je realer die Gegenstände einer Ebene, desto weiter oben befindet sie sich in der Liste. Diese Form der Auflistung entspricht auch einer *epistemologischen* Konstitution von unten nach oben: Wir beginnen auf der basalsten Ebene, den Phänomenen, und arbeiten auf dem Weg nach oben immer größere Invarianzen heraus. *Ontologisch* müssten wir im Sinne eines Physikalismus die Reihenfolge allerdings wieder umkehren: Das Fundament bilden hier die physikalischen Gegenstände, etwa Elektronen, aus denen die Gegenstände der Alltagswelt und letztlich auch wir Menschen inklusive unserer phänomenalen Wahrnehmungen zusammengesetzt sind und hervorgehen.

<sup>20</sup> „Systems of relations“, vgl. Neuber 2012, S. 7.

<sup>21</sup> Vgl. Carnap 1928b.

<sup>22</sup> Es geht zuvor um die Entdeckung des Snelliusschen Brechungsgesetzes.

<sup>23</sup> Kaila spricht von „Interpolationen und Extrapolationen.“ Vgl. hierzu das oben angeführte Zitat Kaila 1941, S. 46 f.

<sup>24</sup> Natürlich handelt es sich bei dieser Beschreibung um eine verkürzte Darstellung der tatsächlichen Vorgehensweise. Kaum eine Hypothese wird nach nur einem Experiment mit gegenteiligem Ergebnis sofort verworfen. Ebenso wenig gilt eine Hypothese als bestätigt, wenn bloß ein Experiment die erwarteten Ergebnisse liefert.

<sup>25</sup> Vgl. Kaila 1941, S. 53.

<sup>26</sup> Nota bene: Eine, nicht die einzige Tätigkeit, die dies ermöglicht. Gleichungen, wie etwa  $\vec{F} = m\vec{a}$ , können z.B. auch erfunden werden.

<sup>27</sup> Die Darstellung hier ist freilich etwas verkürzt. Für eine vornehmlich historische, aber auch systematische Diskussion der Rolle des Experiments in der Wissenschaft, des Unterschieds zwischen bloßer, passiver Beobachtung und aktivem Experimentieren, der verschiedenen Funktionen von Instrumenten im Experiment und der Theoriebeladenheit des Experiments siehe Heidelberger 1998.

<sup>28</sup> Man könnte an dieser Stelle einwerfen, dass die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit formal aus der Annahme der Anwendbarkeit der Lorentz-Transformationen folgt. Diese Annahme ist jedoch nur richtig, wenn man die Konstanz

---

der Lichtgeschwindigkeit schon voraussetzt. Das war – historisch betrachtet – bei Einsteins Herleitung der Lorentz-Transformationen auch so der Fall. Vgl. Einstein 1905.

<sup>29</sup> Kaila 1941, S. 60.

<sup>30</sup> Kaila 1941, S. 67.

<sup>31</sup> Worrall 1989.

<sup>32</sup> Worralls *Strukturenrealismus* wiederum speist sich aus Bertrand Russells *formalem Strukturalismus* („[...] only the structure, that is, the totality of formal, logico-mathematical properties, of the external world can be known [...]” (Psillos 2007, S. 238)) sowie Poincarés und Duhems *Theorienstrukturalismus* („[...] there is continuity at the level of the structural description of the world: the structure of the world could be revealed by structurally-convergent scientific theories.” (Psillos 2007, S. 238)).

<sup>33</sup> Inwiefern es sich dabei tatsächlich um Aussagen über die Welt handelt, ist fraglich. Vgl. dazu weiter unten in diesem Abschnitt.

<sup>34</sup> In Anführungszeichen, da es sich bei diesen Argumenten eigentlich nicht um echte Gegenargumente handelt. Das wird im Folgenden deutlich.

<sup>35</sup> Auch hier haben wir es mit einer Form des Invarianzkriteriums für die Zuschreibung von Realität zu tun, in diesem Fall über den Wandel der Theorien hinweg.

<sup>36</sup> Vgl. Neuber 2012, S. 19.

<sup>37</sup> Für ernstzunehmende physikalische Theorien, um die es in dieser Arbeit ja vor allem geht, trifft dies allerhöchstens in ihrem frühesten Entwicklungsstadium zu. Aus diesem Grund werden wir diesen Ansatz hier nicht weiter verfolgen.

<sup>38</sup> Vgl. hierzu abermals die Darstellung des Strukturalismus von Poincaré und Duhem in Psillos 2007, S. 238: „[...] *the structure of the world* could be revealed by structurally-convergent scientific theories.” Ebenso Ladyman 2009, 1. Introduction: „[...] structural realism [is] committing us to the claim that the theory's structure, over and above its empirical content, *describes the world*” (Hervorhebungen in beiden Zitaten von mir.) Diese Position enthält – nimmt man sie beim Wort – eine ontologische Behauptung, die über die instrumentalistische Identifikation von theoretischer Struktur und mathematischer Gleichung hinaus geht.

<sup>39</sup> Vgl. Neuber 2012, S. 20, Fußnote 44.

<sup>40</sup> Ladyman 2009, 4. Ontic Structural Realism (OSR).

<sup>41</sup> „[...] eliminativism does not require that there be relations without relata, just that the relata not be individuals.” Ladyman 2009, 4. Ontic Structural Realism (OSR).

<sup>42</sup> Neuber 2012, S. 20, Fußnote 44.

---

43 Ich erlaube mir, dieses Problem mit „Structure aaall the way dooown“ zu bezeichnen.

44 Dieses Problem möchte ich „Structure aaall the way round“ nennen.

45 Carnap 1928b.

46 Für die Klärung einiger Fragen bezüglich der Interpretation von Carnaps *Aufbau* sei Daniel Bosse und Florian Grauer (Tübingen) gedankt!

47 Sofern wir bezüglich unserer Erkenntnisbasis diese Wahl überhaupt haben! Nicht ohne Grund wählt Carnap, trotz aller prinzipieller Freiheiten, die eigenpsychische Basis, und nicht ohne Grund befinden sich an der Basis von Kailas „Konstitutionssystem“ die  $\varphi$ -objects. Unser erster und grundlegendster Zugang zur Welt besteht nun mal im sinnlich Erfahrbaren.

48 Dies ist die Forderung, die der Epistemische Strukturenrealismus in seiner einfachen Form gemeinhin nicht erfüllt.

49 Dies ist die Forderung, der der Ontische Strukturenrealismus in seiner einfachen Form nicht nachkommt.

50 Diese Forderung wird weder im Epistemischen, noch im Ontischen Strukturenrealismus berücksichtigt.

51 Analog: Wer die Idee der Existenz göttlicher Wesenheiten für sich prinzipiell ablehnt, braucht sich auch keine Gedanken darum zu machen, ob er nun Anhänger des Christentums, des Islam, des Hinduismus oder sonst einer Religion werden soll.

52 Man denke etwa an die sogenannte dunkle Energie. Der Name ist bis dato lediglich ein Platzhalter und bezeichnet die hypothetische Ursache für die beschleunigte Ausdehnung des beobachtbaren Universums. Die Ursache selbst ist momentan noch Gegenstand von Spekulationen und experimentell (noch) nicht zugänglich, ihre Wirkung aber sehr wohl beobachtbar. Insofern handelt es sich hier *nicht* um etwas *prinzipiell* Unzugängliches. Auch *noch nicht* oder *nur eingeschränkt* Zugängliches ist *prinzipiell* zugänglich. Ein ähnlicher, aber doch etwas anders gelagerter Fall ist der Nachweis des Higgs-Feldes, der erst mit dem Bau eines entsprechenden Beschleunigers möglich wurde, also von der technischen, aber auch der politisch-gesellschaftlichen Machbarkeit eines solchen Großexperiments abhängig war. Sowohl unsere technischen, als auch unsere gesellschaftlichen Möglichkeiten unterliegen aber einer historischen Entwicklung, von deren aktuellem Stand die Frage nach dem, was *prinzipiell* zugänglich ist, nicht abhängen kann.

53 Das gilt in dieser simplen Form zumindest für die klassische Physik. Bei quantenmechanischen Messprozessen beeinflussen sich messendes und zu messendes System mitunter so stark, dass auch der Zustand des zu messenden Systems nach der Messung ein anderer ist als zuvor. Dennoch korrelieren beide Zustände nach der Messung.

---

<sup>54</sup> Ich erlaube mir, die Details dieser Position nicht noch einmal zu wiederholen und stattdessen auf meine Ausführungen weiter oben zu verweisen.

<sup>55</sup> Hier drängt sich natürlich die Frage auf, ob  $\phi$ -objects selbst zum Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchung werden können. Die Beantwortung dieser Frage hängt ganz vom Erkenntnisziel einer solchen Untersuchung ab. Die qualitativ-phänomenale Erfahrung, eine Erdbeere zu sehen oder zu schmecken, ist hochgradig subjektiv und kann nicht in einer objektiven Art und Weise beschrieben werden. Welche Hirnareale beim Anblick oder beim Genuss der Erdbeere aktiv sind, welche Neurotransmitter ausgeschüttet werden dagegen schon. Es ist nur fraglich, ob man mit solchen Methoden etwas über die Qualität der Erfahrung erfährt. Vermutlich eher nicht.

<sup>56</sup> Für eine genauere Darstellung dieser Einschränkung und die weiteren Details dieser Position verweise ich abermals auf meine Ausführungen oben.

## Literatur

Carnap, R., 1928a: *Scheinprobleme in Der Philosophie*. Berlin: Bernary.

———. 1928b: *Der Logische Aufbau Der Welt*. Berlin: Bernary.

Dawid, R., 2013: *String Theory and the Scientific Method*. Cambridge: Cambridge University Press.

Einstein, A., 1905: Zur Elektrodynamik Bewegter Körper. In: *Annalen Der Physik*, 322, S. 891–921.

Esfeld, M., 2004: Quantum Entanglement and a Metaphysics of Relations. In: *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, no. 35B: S. 601–617.

Feigl, H., 1950: Existential Hypotheses: Realistic Versus Phenomenalistic Interpretations. In: *Philosophy of Science*, 17. Chicago: The University of Chicago Press.

Heidelberger, M., 1998: Die Erweiterung Der Wirklichkeit Im Experiment. In: M. Heidelberger & Friedrich Steinle (Hrsgg.): *Experimental Essays - Versuche Zum Experiment*, Baden-Baden: Nomos, S. 71-92

---

Kaila, E., 1941: Über Den Physikalischen Realitätsbegriff - Zweiter Beitrag Zum Logischen Empirismus. In: *Acta Philosophica Fennica*, 4, Helsinki.

Kaila, E., 1979a [1936]: On the System of the Concepts of Reality. A Contribution to Logical Empiricism. In: R. S. Cohen (Hrsg.), *Reality and Experience: Four Philosophical Essays*, Dordrecht: Reidel, S. 59–125.

Kaila, E., 1979b [1942]: On the Concept of Reality in Physical Science. Second Contribution to Logical Empiricism. In: R. S. Cohen (Hrsg.), *Reality and Experience: Four Philosophical Essays*, Dordrecht: Reidel, S. 126–258.

Ladyman, J., 2009: Structural Realism. In: Edward N. Zalta (Hrsg.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*,  
<http://plato.stanford.edu/archives/sum2009/entries/structural-realism/>

Neuber, M., 2012: Invariance, Structure, Measurement - Eino Kaila and the History of Logical Empiricism. In: Sven Ove Hansson (Hrsg.), *Theoria*, 78, Hoboken: Wiley-Blackwell S. 358-383.

Niiniluoto, I., 1992: Eino Kaila and Scientific Realism. In: Ilkka Niiniluoto, M. Sintonen, and G. H. von Wright (Hrsg.), *Acta Philosophica Fennica*, 52, *Eino Kaila and Logical Empiricism*, Helsinki S. 102-116.

Nozick, R., 2001: *Invariances - The Structure of the Objective World*. Cambridge: Harvard University Press.

Psillos, S., 2007: *Philosophy of Science A-Z*. Edinburgh: Edinburgh University Press.

Reichenbach, H., 1938: *Experience and Prediction: An Analysis of the Foundations and the Structure of Knowledge*. Chicago: University of Chicago Press.

Worrall, J., 1989: Structural Realism: The Best of Both Worlds? In: *Dialectica*, 43, S. 99–124.