

Die rätselhafte Fernwirkung physikalischer Felder

Die Tatsache, dass Gegenstände über weite Entfernungen hinweg Kraftwirkungen aufeinander ausüben können, war schon zu Zeiten Aristoteles eine dubiose Angelegenheit – und daran hat sich bis heute nichts geändert.

Physiker(innen) und Philosophen haben darüber gerätselt, wie ein Gegenstand es mühelos fertigbringt, durch das Vakuum hindurch über weite Entfernungen hinweg einen anderen gleichartigen Gegenstand zu beeinflussen. Newton nahm es noch als gottgegeben an, dass zwei auseinanderliegende Massen durch den leeren Raum hindurch längs ihrer Verbindungslinie anziehende Kräfte aufeinander ausüben.

Faraday – der Vater des Feldbegriffs - spekulierte, dass magnetische Kräfte durch eine Art Verspannungen im Äther längs bestimmter Bahnen (Feldlinien) von einem zum anderen Magnetpol übertragen werden. Die Kraftausbreitung im Raum vermittels eines Äthers war auch noch Grundlage für das physikalische Modell der Maxwell'schen Theorie der Elektrodynamik, hier schon mit einem Feldbegriff verbunden (elektrisches bzw. magnetisches Feld). Erst Einstein emanzipierte den Feldbegriff vom Vorhandensein eines Trägers namens Äther, indem er im Rahmen seiner speziellen Relativitätstheorie behauptete, es mache keinen Sinn mehr, in physikalischen Theorien von der Existenz eines Äthers zu sprechen.

Das hatte erhebliche Konsequenzen. Denn von nun an sollte ein Feld ohne Träger auskommen, also keine Eigenschaft mehr eines Mediums sein, das den Raum erfüllt, eines Mediums, dem man an jedem Raumpunkt konstante oder in Raum und Zeit veränderliche physikalische Größen anheften konnte, so wie man einer Wasserwelle Auslenkungen der Wasseroberfläche und einer Schallwelle Dichteschwankungen der Luft zuordnen kann. Jetzt waren die Feldeigenschaften mit den Punkten des Raumes selbst verbunden. Von nun an sollte ein Feld aus nichts anderem mehr bestehen, als aus einer Zuordnung von physikalischen Eigenschaften oder Kräften an jedem Raumpunkt selbst.

Nun ist das logisch Besondere an den physikalischen Eigenschaften und Kräften, dass sie zwar als vollständig gesonderte Entitäten gedacht werden können, dass sie aber dennoch ohne einen Gegenstand nicht zur physikalischen Existenz befähigt sind (nicht erkennbar oder erfahrbar sind). Gegenstand und Eigenschaft, Gegenstand und ausgeübte Kraft, sind immer mindestens eine Zweiheit in einer Einheit: weder Eigenschaft noch Kraft noch Gegenstand können als getrennte Einzelheiten sinnhaft auftreten - es gibt sie sinnvoll immer nur in einem Zweier- oder Dreierpack.¹ Die Physik hat aber

¹Kräfte haben immer einen Angriffspunkt an einem Gegenstand, und weder eigenschaftslose „Irgendwasheiten“, noch gegenstandslose Eigenschaftsbündel konnten sich in der Philosophie bisher als überzeugende Gegenstandsontologien behaupten. Die

nach dem Wegfall des Äthers einen Gegenstand als Träger physikalischer Eigenschaften oder Hebel von Kräften nicht mehr zur Verfügung gehabt. In Ermangelung dessen musste sie in ihren klassischen Feldtheorien die physikalischen Eigenschaften oder Kräfte mit den Punkten des leeren Raumes direkt verknüpfen, so als wären diese Raumpunkte Gegenstände, die Eigenschaften haben, und Kräfte ausüben, wo doch der leere Raum logisch und strukturell eher wie ein Behälter für Gegenstände erscheint, aber nicht wie ein Gegenstand selbst.

Wie konnte es zu all dem kommen? Jahrtausende lang wurden Diskussionen über die gegenständliche Ontologie dieser Welt geführt, ohne dass es an analytischer Klarheit und Stringenz in der Argumentation gemangelt hätte. Doch dann, zum Ende des 19ten Jahrhunderts, tritt die Physik auf den Plan, und behauptet unbekümmert, sie habe die empirisch bestätigte Gewissheit, dass die Natur einem Modell gleich wäre, bestehend aus einer wundersamen Ontologie, nämlich aus einem Nichts, das Eigenschaften hat, oder Kräfte ausübt.

Die unbestimmten Ontologien der Physik

Die Physik hat in ihrer neueren Geschichte viele höchst seltsame physikalische Gegenstände zum ontologischen Inventar dieser Welt erklärt. Neben Felder und Wellen finden sich da Quanten und punkthafte Teilchen, Anregungen und anderes Virtuelles. Über die schon aus logischen Gründen berechtigte Frage, ob die theoretisch postulierten fundamentalen Objekte nun real existieren, oder nur modellhafte Konstrukte darstellen, wurde von Philosophen in vielen Debatten lebhaft, aber leider ergebnislos, diskutiert.² Nun ist es auch nicht primär die Aufgabe der Philosophie herauszufinden, was ein physikalisches Feld ist, oder nicht ist, sondern Aufgabe der Physik, uns zu sagen, um was es sich dabei ontologisch handelt. Und da stößt man in allen Recherchen auf Vieles, aber wenig Erhellendes.

Die Behauptung beispielsweise, ein Feld beschreibe die „Verteilung einer messbaren physikalischen Größe im Raum“, wie vielerorts (zum Beispiel in der deutschen Wikipedia Stand 12/21) zu lesen ist, lässt nur den instrumentellen Aspekt des Feldbegriffs aufscheinen. Eine Referenz auf ontologische Aspekte des Feldes ergibt sich bei dieser

moderne Physik hat mit ihrem ungelösten „Messproblem“ die seltsame Verbundenheit zwischen physikalischem Gegenstand und Eigenschaft weiter problematisiert.

² siehe insbesondere sog. Realismusdebatte. Die Frage, ob die von den physikalischen Theorien postulierten Entitäten Realcharakter haben oder nicht, blieb in dieser Debatte ohne klares Ergebnis. Realisten und Antirealisten berufen sich beide auf die empirische Adäquatheit physikalischer Theorien. Die empirische Adäquatheit physikalischer Theorien wird nach meiner Auffassung von beiden Parteien jedoch missverstanden. Beiden Parteien ist nicht klar, dass eine physikalische Theorie immer nur in Teilen empirisch adäquat ist, nämlich nur in den Teilen, die Aussagen zu Kräften und Wechselwirkungen machen, aber niemals in den Teilen, die Aussagen zu den agierenden (reduzierten) Ontologien machen. Ohne in dieser Weise zu differenzieren, kann die empirische Adäquatheit einer Theorie nicht überzeugend zur Begründung eines realistischen oder nicht-realistischen Standpunktes herangezogen werden.

Deutung des Feldbegriffs nur aus dem Umstand, dass ein im Raum vorhandener *Träger* natürlich an allen Raumstellen physikalische Eigenschaften haben kann, wie einen Temperaturwert oder einen Dichte- oder einen Geschwindigkeitswert. In weiter Auslegung des Begriffs „Feld“ kann man auch hier von einem physikalischen Feld sprechen. Aber in diesem meinem Essay geht es nicht um die räumliche Verteilung von Beträgen einer physikalischen Größe, die einem Träger im Raum zukommen. Es geht um *trägerlose* Felder, wie es Gravitationsfelder sind, elektrische und magnetische Felder, und Strahlungsfelder (elektromagnetische Wellen), die bekanntermaßen und erstaunlicherweise keinen Träger haben.

Das sind Felder, die ein „substanzloses“ (?) Etwas darstellen, das das Vakuum, und sich selbst, wechselwirkungsfrei durchdringt, und sich dabei mit seinesgleichen überlagert (superponiert, Kraftwirkungen zweier Felder addieren sich). Auf solche trägerlosen Felder trifft die Behauptung, ein Feld beschreibe die Verteilung einer physikalischen Größe im Raum, *nicht* zu. Denn welche Eigenschaften oder Kräfte sollten an einen *nicht vorhandenen* Träger - oder gar an den Punkten des Raumes selbst - angeheftet sein? Eine Messung kann immer nur an einem Testobjekt erfolgen, also an einem nicht-feldhaften Gegenstand, an einem Feld selbst kann man gar keine Messung vornehmen. Und wer glaubt, ein Feld selbst würde eine Kraft auf ein Testobjekt ausüben, muss sagen, welche Kraft das Testobjekt nach dem Prinzip von *actio* gleich *reactio* auf das Feld ausübt. Eine solche *reactio* ist schlichtweg nicht zu erkennen.

Dennoch ist die Idee des Feldes als Substanz nicht auszurotten. In der englischen Wikipedia ist zu lesen (Suchwort „field (physics)“, 2021): *„Im modernen Rahmen der Quantentheorie der Felder, auch ohne Bezug auf ein Testteilchen, nimmt ein Feld Raum ein, enthält Energie, und seine Anwesenheit schließt ein klassisches wahres Vakuum aus. Dies hat Physiker dazu veranlasst, elektromagnetische Felder als eine physikalische Entität zu betrachten, was das Feldkonzept zu einem tragenden Paradigma des Gebäudes der modernen Physik macht.“*

Diese Erläuterung soll dazu verleiten, Felder und Wellen als *reale* fundamentale physikalische Objekte aufzufassen, die Energie haben (Einwand von mir: ein statisches Feld hat gar keine Energie), so als könne man den üblichen Substanzbegriff hier anwenden, dies auf ein Objekt, das den leeren Raum „verdrängt“ und, aus diesem Grund, irgendetwas „Raumgreifendes“ oder Materielles (ja was bloß) sein muss. Aber diese unbestimmte „physikalische Entität“ wird dann zur paradigmatischen, tragenden Säule des Gebäudes der modernen Physik erklärt. Da staunt der Laie und der Philosoph wundert sich.

Die instrumentelle Sicht auf die Feldontologie

Der Instrumentalist ist der Meinung, es sei nicht die Aufgabe der Physik, herauszufinden, woraus die Welt besteht, sondern nur wie sie funktioniert. Im Klartext: was ein Feld ist, das sollte man die Physik nicht fragen. Die Mathematik der Feldtheorien gestattet es, mit höchster Effektivität rechnerisch die richtigen Vorhersagen zu machen. Somit beruht der Erfolg der Physik auf dem hervorragend funktionierenden *mathematischen* Instrumentarium, das die Feldtheorien den Physikern, Physikerinnen und Ingenieuren zur Verfügung stellen, trotz aller Unkenntnis über die Ontologie der Felder selbst. Kurzum: aus instrumenteller Sicht ist die ontologische Frage für den Erkenntnisfortschritt schlicht irrelevant.

Tatsächlich scheint es schwierig zu sein, aus den mathematischen Gleichungen, die den Kern einer jeden physikalischen Theorie ausmachen, zu entschlüsseln, wie die äußere Welt beschaffen ist. Dagegen ist es leicht, aus der Mathematik herauszulesen, welche Kräfte in der äußeren Welt herrschen. Kurz gesagt: die Mathematik aller Theorien beschreibt empirisch adäquat die Kräfte, die zwischen den Objekten herrschen (zum Beispiel die Gravitationskraft). Sie beschreibt aber *nicht* empirisch adäquat die real agierenden Objekte selbst (zum Beispiel als Massenpunkte). Physiker(innen) dürfen daher in ihren Modellen die physikalischen Objekte weitestgehend idealisieren und reduzieren, solange dies keine Konsequenzen auf die von ihnen ausgehenden Kräfte hat. Sie dürfen ihre Modellobjekte all ihrer Eigenschaften entkleiden, bis sie nur noch die Eigenschaften haben, die für ihre funktionale Rolle im Zusammenwirken der Kräfte gerade noch nötig sind. Aus Sicht des Instrumentalisten sind die Modellobjekte nur reduzierte Stellvertreter für das, was in der Realität die richtigen Kräfte ausübt. Die Physik ist somit gar nicht darauf aus, mit der von ihr ge- oder erfundenen Ontologien eine immer größere "Näherung" an die Realität, wie sie ist, herbei zu führen, sondern nur die von den Modellen hervorgesagten Kräfte mit den realen Kräften in immer besserer Übereinstimmung zu bringen.

Die instrumentelle Sicht ist eine pessimistische Sicht. Danach gewinnt die Physik mit ihren Methoden zuerst (oder nur?) Erkenntnis über die Wirkung, und dann erst über die Ontologie (wenn überhaupt). Danach ist es leichter zu verstehen, wie die Welt funktioniert, als zu verstehen, aus was sie besteht. Die Physik kann uns sagen, wie etwas funktioniert, aber nicht, aus was es aufgebaut ist, und es scheint so, als wären die Vorhersagen über die Funktionen umso besser, je mehr spezifische anschauliche Eigenschaften der agierenden Entitäten bei der Bildung der Modelle wegreduziert wurden. Da über die wegreduzierten Eigenschaften grundsätzlich keine Erkenntnis mehr möglich ist, wird Erkenntnisgewinn über die Funktion mit Erkenntnisverlust über die

Ontologie erkaufft. Gleichzeitiges Wissen über das, was ist, und wie es wirkt, ist anscheinend nicht möglich.³

Doch diese pessimistische Sicht ist nicht das einzige Problem des Instrumentalisten. Er hat noch ein anderes Problem, nämlich das Problem, dass er seinen instrumentellen Standpunkt in der Praxis außerhalb des Wissenschaftsbetriebs nicht durchhalten kann. Sein Standpunkt wird für ihn immer dann zu einem Problem, wenn er einem Fragesteller außerhalb des Wissenschaftsbetriebs erklären soll, was in einer experimentellen Apparatur, was in der Wirklichkeit tatsächlich vor sich geht. Denn im Alltag werden doch Fragen gestellt: was *ist* Licht, was *sind* Röntgenstrahlen in der Zahnarztpraxis, was *ist* das Magnetfeld der Erdkugel, was *sind* das für Wellen, die vom Handy abgestrahlt werden, ja auch vor Gericht, wenn in einem Prozess eine Klägerin behauptet, das elektromagnetische Feld einer Hochspannungsleitung über ihrem Haus würde ihr Übelkeit und Kopfschmerzen verursachen. Auf die Frage des Richters, ob ihm jemand erklären könne, was denn ein elektromagnetisches Feld sei, von dem hier ständig die Rede ist, muss der Instrumentalist konsequenterweise antworten: das wissen wir nicht, aber wir können *so tun als ob* - als gäbe es hier etwas, zum Beispiel eine bestimmte mathematische Figur, ein idealisiertes Artefakt, das den Raum durchdringt und durchwandert. Es ist schwer vorzustellen, dass diese Beschreibung des Sachverhalts „elektromagnetisches Feld“ von einem logisch denkenden Fragesteller, der auf der Suche nach der (Rechts-)Wahrheit ist, nachvollzogen werden kann, geschweige denn von ihm akzeptiert wird.

Die Sichtweise des Realisten

Ganz anders der Realist, der davon ausgeht, dass die von der Mathematik beschriebenen "seltsamen" Entitäten, die da wirken, eine objektive reale Tatsache darstellen (wie auch immer). Die beobachteten Wirkungen kämen ja einem Wunder gleich, wenn es die von der Theorie postulierten wirkenden Entitäten in der Realität gar nicht gäbe.

Jahrtausendlang hielt sich die Vorstellung, die Welt sei aufgebaut aus unteilbaren kleinen Einzelteilen, doch mit dem Aufkommen der Quantentheorien lösten sich diese Gegenstände auf, sie verkümmerten zu punktförmigen Gebilden (Elektronen, Quanten, Elementarteilchen), verschwanden in Unschärfen (Heisenberg) und Interferenzen (Materiewellen), das Quantenfeld trat an ihre Stelle, ein kontinuierliches und vieldimensionales Etwas, aus dem doch wieder durch Wellung, Verkörnung und Auskoppelung das fundamentale Einzelne auf wundersame Weise emergiert; dazu kommen noch Mischwesen, das sind kleine Quanten, die scheinbar punktförmige Einzelteile sind,

³Insbesondere in der lebendigen Welt gibt es Erscheinungen, die von physikalischen Objekten hervorgebracht werden, die sich aber nicht aus den Eigenschaften und dem Zusammenwirken dieser physikalischen Objekte erklären lassen (sogenannte emergente Erscheinungen). Wen wundert diese Unerklärbarkeit, wenn den physikalischen Objekten im Zuge modellhafter Reduktion alle die Eigenschaften genommen wurden, die möglicherweise zu einer Erklärung hätten beitragen können.

aber dennoch Eigenschaften haben, die nur eine kategorial ganz andere Gegenstandsklasse, nämlich dynamische Wechselfelder, aufweisen (Polarisation und Frequenz); und auch die Quantenobjekte, von denen man aus Vorerfahrungen weiß, dass sie sich in einer Apparatur wie kleine Teilchen verhalten, können plötzlich, wenn sie von der Apparatur die Möglichkeit dazu bekommen, auf wundersame Weise Interferenzen zeigen, wie sie nur Felder hervorbringen – dies alles nur dem Eingeweihten verständlich, der die Geheimnisse der mathematischen Beschreibung dieser seltsamen Ontologie richtig zu deuten weiß. Den vielen "ens per se", die die Welt bevölkern, und denen man nach Wechselwirkungen spezifische Eigenschaften zuschreiben kann, tun sämtlich so, als seien sie bei starken Wechselwirkungen Teilchen, bei schwachen Wechselwirkungen jedoch Wellen (dynamische Wechselfelder) - was für eine schillernde Ontologie, die nur der beschreiben kann, der sich bei seinen Bemühungen einer anschaulichen und verständlichen Darstellung über Logik und Stringenz - den bewährten Regeln philosophischen Diskurses - kühn hinwegsetzt.

Aber der Realist ist der Überzeugung, dass ihm bewährte Begriffe zur Verfügung stehen, dass die Mathematik der physikalischen Theorien und die experimentellen Ergebnisse es ermöglichen, die Welt, wie sie ist, immer besser zu erkennen. Der Einsatz dieser bewährten Mittel hat ihm die Gewissheit gegeben, dass die subatomare Welt, die Welt im ganz Kleinen, und die Felder der klassischen Physik, nicht anschaulich darstellbar sind, dass diese Dinge nur widersprüchlich beschreibbar sind, nur von Eingeweihten zu „verstehen“ sind. Der naive Realist behauptet, er hätte trennscharfe Beobachtungs- und Analysemittel, und wenn er damit auf den kleinsten Skalen nur Unschärfes erkennen kann, dann müsse die Welt auf den kleinsten Skalen auch unsharp *sein*.⁴

Der Realismus ist vor allem außerhalb des Wissenschaftsbetriebs allgegenwärtig, wenn auch in verschiedensten Formen. Kaum einer äußert Zweifel daran, dass ein magnetisches Eisen von einem Magnetfeld umgeben ist, und ein Elektron von einem elektrischen Feld - so als würde das magnetisierte Stück Eisen, oder das Elektron, den physikalischen Sachverhalt „Feld“ sozusagen in den umgebenden Raum induzieren, sodass ein „Feld“ dort zwar unsichtbar, aber physikalisch nachweisbar vorhanden wäre, nachweisbar durch seine Wirkungen. Und auch für die elektromagnetische Strahlung (Licht, oder Handywellen) ist die Vorstellung vorherrschend, dass sich ausgehend von einem Emissionsort (Handy, Lichtquelle, Sonne) etwas Stoffliches oder Energetisches, etwas Materielles, oder was auch immer, in jedem Fall etwas *Reales*,

⁴ Mit einem Vertreter des Realismus sollte man besser nicht über die Realität reden, wie sie ist, sondern über seine Methoden und Instrumente. Es gibt zahlreiche Einwände gegen den Realismus, zum Beispiel das aus den Historien physikalischer Erkenntnisgewinnung abgeleitete Argument, dass viele Entitäten, die man zunächst als real angesehen hatte, sich später als konstruiert herausstellten (sog. Argument der „pessimistischen Metainduktion“), und andere Argumente. Letztlich bleibt die Frage, welcher Realstatus die von den physikalischen Theorien postulierten und nicht direkt beobachtbaren Entitäten zukommt, von der Physik und der Philosophie der Physik unbeantwortet. In diesem Essay wird die Frage nach dem Realstatus von physikalischen Feldern und Quantenobjekten nicht gestellt, sondern nur die Frage, ob und wie man diese physikalischen Gegenstände kohärent und konsistent (und damit „verständlich“) **beschreiben** kann.