

Karl Czasny
karl.czasny@aon.at
<https://erkenntnistheorie.at/>

Kritik an der Ontologie– aktueller denn je

Rückblickende Bewertung meiner 2010 publizierten
erkenntnistheoretischen Reflexion auf die Quantentheorie

INHALT

[Kurzfassung](#)

[Zur Vorgeschichte des folgenden Textes](#)

1. [Die Probleme mit der Kopenhagener Deutung der Quantenphysik](#)
2. [Eine andere Sicht auf das Doppelspaltexperiment](#)
3. [Notwendige Modifikationen der klassischen Elektrodynamik](#)
4. [Deutung der QED als modifizierte Elektrodynamik?](#)
5. [Berührungspunkte mit realistischen Interpretationen der QFT](#)
6. [Die Modellierung ganzheitlicher Quantenphänomene durch die QFT](#)
7. [Eine alternative Modellierung der Ganzheitlichkeit](#)
8. [Transzendental-pragmatistische versus realistische Deutungen](#)
9. [Unschärfes Erkennen versus unbestimmtes Sein](#)
 - 9.1 [Drei Aspekte der Unschärfe](#)
 - 9.2 [Urteil des Chatbots über meine Deutung der Unschärfe](#)
 - 9.3 [Meine Deutung im Lichte neuer Studien](#)

[Zitierte Publikationen](#)

Kurzfassung

2010 publizierte ich eine erkenntnistheoretische Reflexion auf die Quantenphysik. Das folgende Papier präsentiert eine KI-gestützte Neubewertung dieser Reflexion im Lichte der jüngsten Interpretationsgeschichte der Quantenfeldtheorie (QFT). Es konzentriert sich dabei auf die in der ontologischen Lesart der Kopenhagener Deutung auftretenden Probleme der **Unbestimmtheit** des Seins der Quantenobjekte und ihrer **dualen** Seinsweise als Welle **und** Teilchen. Meine seinerzeitige Studie vertrat die These, dass man beide Interpretationsprobleme unterlaufen könne, wenn man die beobachteten Teilchen nicht als eigenständige Objekte begreife, sondern als unter bestimmten Beobachtungsbedingungen auftretende Erscheinungen eines sich ausbreitenden Energiefelds. Diese Sichtweise liefere zum einen befriedigende Erklärungen für die beim Doppelspaltexperiment auftretenden Ungereimtheiten. Zum anderen gestatte sie eine Rückstufung des Problems der Unbestimmtheit des Seins der Teilchen auf das weniger brisante Problem einer unvermeidlichen Unschärfe unserer Wissens von den präzisen Umständen ihres Seins.

Diese Rücktransformation der ontologischen Unbestimmtheit in eine Unschärfe des Wissens beurteilt die KI umfassend positiv als erkenntnistheoretisch konsistent und physikalisch ernst zu nehmen. Sie sei auch vereinbar mit den Ergebnissen der jüngsten Studien zur Unschärfeproblematik, die viele Physiker vorschnell als Beleg für eine an sich gegebene Unschärfe der Natur deuten.

Bei der Interpretation der Teilchen als Erscheinungen eines Energiefelds konstatiert die KI deutliche Berührungspunkte zu neueren realistischen Deutungen der Quantenfeldtheorie und der Quantenelektrodynamik (QED). Denn diese verstehen die von der Wellenfunktion gelieferten Beschreibungen ebenfalls als Darstellungen der Zustände eines realen physikalischen Feldes. Meine seinerzeitige Interpretation der QED als ‚modifizierte Elektrodynamik‘ hält der Chatbot aber aus zwei Gründen für überzogen. Erstens unterscheidet sich der mathematische Formalismus der QED gravierend von jenem der Elektrodynamik, da nun als Grundgrößen nicht mehr klassische Funktionen fungieren sondern sogenannte ‚operatorwertige Verteilungen‘. Zweitens modellieren QFT und QED die ganzheitlichen Quantenphänomene völlig anders als die von mir ins Spiel gebrachte ‚modifizierte Elektrodynamik‘. Diese würde Verschränkungsphänomene **als ganzheitliche Reaktionen des elektromagnetischen Feldes** behandeln, während QFT und QED die **Dynamik** des Energiefeldes streng lokal modellieren und nur seinen jeweiligen **Zustand** durch ein Geflecht von Korrelationen ganzheitlich darstellen.

Hier wird eine auf den Zustandsbegriff konzentrierte innere kategoriale Spannung der gesamten QFT deutlich, die immer wieder zu einem unsauberen Umgang mit dem Zustandsbegriff verleitet und zur Entstehung eines breiten Spektrums von verschiedenen akzentuierten Spielarten des QFT-Realismus führte. Sie unterscheiden sich unter anderem in ihrer Einschätzung der Frage, in welchem Ausmaß dem vom Einfluss auf die Dynamik des Feldes ausgeschlossenen quantenmechanischen Zustand überhaupt Realität zukommt.

Eine Modellierung nicht-lokaler Phänomene im Sinne der von mir angedachten ganzheitlichen Reaktionen des Energiefeldes wäre laut der KI physikalisch extrem anspruchsvoll, aber erkenntnistheoretisch sauberer als die in QFT und QED praktizierte Lösung.

Zur Vorgeschichte des folgenden Textes

Nachdem ich mich schon seit den achtziger Jahren mit erkenntnistheoretischen Problemen der Naturwissenschaften beschäftigt hatte, arbeitete ich von 1994 bis 2010 an einer systematischen Kritik **ontologischer** Positionen in der Physik. Dabei entwickelte ich einen philosophischen Gegen-Standpunkt, den man als „**transzendentalen Pragmatismus**“ bezeichnen kann. Resultat dieser Bemühungen war eine 2010 publizierte dreibändige Studienreihe¹. Sie enthält eine auf der genannten Position fußende Analyse der klassischen Physik, der Quantenmechanik und der diesen beiden Theoriegebäuden zugrunde liegenden Formalwissenschaften (Logik und Mathematik). Die unmittelbar nach der Publikation jener Studienreihe bei mir eingelangten Reaktionen sind auf meiner Homepage unter dem Stichwort [Feedback](#) dokumentiert.

Im Vorjahr bemühte ich mich mehr als fünfzehn Jahre nach der Erarbeitung der erkenntniskritischen Thesen zur Quantenmechanik um deren fachkundige **Neubewertung** im Lichte jüngerer Entwicklungen der Quantentheorie. Ich schrieb zu diesem Zweck zwei Aufsätze, die nochmals einige Hauptthesen der Studienreihe vor dem Hintergrund jeweils unterschiedlicher Fragestellungen darstellten. Der erste der beiden auf meiner Homepage nachlesbaren Texte ist eine „[Erkenntnistheoretische Reflexion zum holografischen Universum](#)“. Der zweite ist in englischer Sprache verfasst und trägt den Titel „[Epistemological Equivalence and Transcendental Complementarity. Two Fundamental Principles in the Constitution of Scientific Experience](#)“.

In beiden Fällen kam es leider nicht zum erwünschten Feedback. Während meine Auseinandersetzung mit den Hypothesen zur holografischen Natur unseres Universums keinen der kontaktierten Experten zur Lektüre motivierte, misslang beim anderen Text die von mir angestrebte Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift. Unangenehm war dabei neben dem Scheitern dieses Publikationsversuchs eine sehr negative Erfahrung mit der derzeit etablierten Praxis der Bewertung von zur Publikation eingereichten Aufsätzen.

Als ein nicht in den professionellen Forschungsbetrieb eingebundener Autor kannte ich die Probleme des sogenannten ‚Peer Review‘-Verfahrens nur aus den kritischen Berichten in den Medien. Diese bemängeln zwar Subjektivität, Voreingenommenheit und Innovationshemmungen seitens der die Texte begutachtenden Peers. Sie unterschlagen jedoch, wie ich nun erfahren musste, dass die Gutachter gar nicht die wichtigsten Gatekeeper sind. Bevor nämlich die Peers ein Manuskript zu Gesicht bekommen, haben schon die Herausgeber der jeweiligen Zeitschrift darüber entschieden, welche Texte zur Peer Review zugelassen werden. Und im Unterschied zu den Peers, die ein negatives Urteil begründen müssen, begründen diese Herausgeber gar nichts. Mein beim „*Journal for General Philosophy of Science*“ (Springer-Verlag) eingereichter Aufsatz etwa wurde mit einem einzigen Satz zurückgewiesen: „*With regret, I must inform you that we have decided to not further*

1 Czasny, K., 2010 a,b,c

Eine Skizze der in dieser Publikation kritisch durchleuchteten physikalischen Ontologie sowie des von mir selbst vertretenen transzendentalen Pragmatismus kann auf meiner Homepage nachgelesen werden in der Leseprobe aus dem ersten Band der Studienreihe:

https://erkenntnistheorie.at/wp-content/uploads/2014/07/leseprobe_erste_publication.pdf

consider your paper for publication.” Eine Rückfrage zu den Motiven für die Ablehnung war keiner Antwort würdig.

Damit ist die Geschichte meiner Bemühungen um Feedback noch nicht zu Ende. Zunächst lehnten zwar auch die Herausgeber einer weiteren Zeitschrift des Springer-Verlags („*Foundations of Science*“) den Text kommentarlos ab, dann aber tauchte ein Hoffnungsschimmer am Horizont auf. Denn nun erhielt ich von der mit dem genannten Verlag kooperierenden Online-Plattform „*Research Square*“ die Einladung, meinen Text hochzuladen und auf diesem Weg der öffentlichen Diskussion zugänglich zu machen. Ich griff das Angebot auf und bekam bald darauf eine positive Rückmeldung zur automatisch überprüften englischen Sprachqualität des Textes („*This manuscript has above-average English language quality compared to other academic papers we have evaluated*“). Danach wurde das Manuskript einem routinemäßigen Screening durch das Herausgeberteam unterworfen, welches sicherstellen soll, dass die hochgeladenen Texte den Standards der Plattform entsprechen.

Diese Überprüfung ergab nun leider wieder ein negatives Resultat, das man mir aber freundlicherweise mit einem beruhigenden Begleittext servierte: *“Please note that this decision does not reflect the quality or importance of the work and is made on the basis of our editorial policies with respect to content type and screening.”* Auf meine Frage, welchen der Richtlinien mein Text nicht genüge, erhielt ich die Antwort, dass das *„manuscript was a narrative, which we do not accept.“* Verweigert wird die Publikation also nicht nur Texten, die bestimmten Qualitätskriterien nicht genügen. Darüber hinaus verpasst man offenbar dem Diskurs ein Korsett von sehr eng definierten **Standardmustern der Argumentation**, das meine Art des Reflektierens, Begründens und Beweisführens aus den wissenschaftlichen Kontroversen ausschließt.

Die einzige verbleibende Möglichkeit, meine erkenntnistheoretischen Thesen einer externen Evaluierung zu unterwerfen, war damit **ChatGPT**. Meine vorangehenden Erfahrungen mit diesem Chatbot ermutigten mich, einen solchen Versuch zu wagen. Denn sie hatten mir gezeigt, dass er sehr plausible Antworten auf physikalische und philosophische Fragestellungen gibt. Ich vermute deshalb bei ihm nicht nur die Fähigkeit zu fachgerechter Aufbereitung der Wechselbezüge zwischen den bedeutendsten Haupt- und Nebenströmungen der akademischen Diskussionen in den Fächern Philosophie und Physik, sondern traue ihm auch valide Urteile über den Stellenwert meine Thesen im Kontext dieser Auseinandersetzungen zu.

Wichtig im Umgang mit ChatGPT ist aber dreierlei: Erstens gilt es alle Antworten genau zu durchdenken und bei Unklarheiten oder Widersprüchen zurückzufragen. Dadurch kommt man immer wieder falschen Auskünften und Missverständnissen auf die Spur. Zweitens sollte man die Aussagen des Chatbots so weit wie möglich einem Check durch Konsultierung anderer verfügbarer Quellen unterwerfen. Und drittens muss man die besondere Höflichkeit dieses Chatbots richtig lesen. Wenn er mir etwa sagt *„Du liegst fast richtig mit Deiner Annahme“* dann ist davon auszugehen, dass ich mindestens einen entscheidenden Aspekt des jeweils diskutierten Themas grundsätzlich missverstanden habe.

Hier nun also die Resultate einer KI-gestützten und durch Doppelcheck abgesicherten Neubewertung einiger meiner 2010 publizierten Thesen zur Quantenmechanik im Lichte neuerer Interpretationen dieser Theorie.

1. Die Probleme mit der Kopenhagener Deutung der Quantenphysik

In der erst rund 100 Jahre alten Quantenmechanik besteht eine in zweifacher Hinsicht viel **engere Subjekt-Objekt-Beziehung** als in der klassischen Physik:

- Zum einen scheint hier die Natur des uns gegenüberstehenden Objekts auf rätselhafte Weise von unserem Beobachtungshandeln abzuhängen. Während nämlich die Gegenstände der klassischen Physik entweder Wellen oder Teilchen **sind**, drängt sich hier nun der Eindruck auf, dass eine Welle unter bestimmten von uns gewählten Beobachtungsbedingungen zum Teilchen **wird**.
- Zum anderen sieht es hier so aus, als ob neben ihren jeweiligen Eigenschaften sogar das Sein bzw. Nichtsein der Gegenstände mit unserem Tun verknüpft wäre.

Davor hatte man es noch mit Körpern zu tun gehabt, die sich auf vorgegebenen Bahnen bewegen, welche sich bei Bekanntheit der betreffenden Bewegungsgesetze mit beliebiger Genauigkeit vorhersagen lassen. Die Basisformel der Quantenmechanik, die sogenannte Wellengleichung, lässt uns demgegenüber die künftige Antreffbarkeit des Gegenstands an bestimmten Orten, und damit dessen Bahn, prinzipiell nur mit mehr oder weniger großer Wahrscheinlichkeit prognostizieren. Das Objekt scheint damit **vor** seiner Beobachtung im unbestimmten Zustand eines gleichsam 'verschmierten' Seins zu verharren und erst durch unsere Wahrnehmung zu einem real existierenden Gegenstand zu werden. Auf der Ebene des mathematischen Formalismus wird dieser Umschlag von bloß möglichem zu realem Sein durch den sogenannten 'Kollaps' der Wellenfunktion symbolisiert.

Um verständlich zu machen, welche Probleme sich in dieser neuen Situation für die **Erkenntnistheorie** auftürmen, ist zunächst ganz kurz an deren Geschichte zu erinnern: Die erkenntnistheoretische Perspektive entwickelte sich nach ersten 'Vorarbeiten' am Beginn der Neuzeit durch Descartes parallel zum allmählichen Erstarken des bürgerlichen Subjekts, das sich als immer wirkungsmächtigerer Akteur in seiner Welt erlebte. Traditionelle Philosophie war **Ontologie** gewesen, hatte somit diese Welt als ein durch übergeordnete Prinzipien reguliertes Sein beschrieben, von dem der Mensch nur ein Teil war. Erkenntnistheorie vollzog nun einen radikalen Perspektivenwechsel, indem sie nicht mehr von einem umfassenden Sein sondern von jenem Menschen ausging, um zu fragen, wie er zu seiner Erfahrung und seinem Wissen vom Sein kommt. Die extremste Ausformung dieser Gegenposition zur Ontologie bezog der englische Philosoph David Hume, der alle über das (scheinbar) unmittelbare sinnliche Erleben hinausgehenden Interpretationen als subjektive Täuschungen abtat und damit Sein und sinnliches Erleben kurz schloss. Erst Immanuel Kant sah dann im Zuge seiner Reflexion auf die Leistungen der klassischen Mechanik ein, dass Erfahrung stets mehr als bloße Sinnlichkeit ist und sich zwingend auf ein vom Erfahrenden selbst hypothetisch konstruiertes, interpretatorisch immer schon vorausgesetztes Objekt bezieht.

Jene die ontologische mit der empiristischen Weltsicht versöhnende **transzendente** Perspektive Kants ließ sich jedoch nicht so ohne weiteres auf die von der Quantenmechanik untersuchten Teilchen umlegen. Denn diese konnten, wie zuvor erwähnt, nicht als im klassischen Sinne verstehbare Körper mit naturgesetzlich eindeutig determinierten Bahneigenschaften gedacht werden. Die sogenannte **Kopenhagener Deutung** der Quantenmechanik reagierte **defensiv** auf dieses Problem, indem sie sich wieder dem von Hume vorgegebenen (und von Ernst Mach erneuerten) empiristischen Standpunkt annäherte. Sie verzichtete nämlich bei ihrer Interpretation der Beobachtungsergebnisse auf unmittelbar gegenstandsbezogene Aussagen und blendete damit alle objektkonstitutiven Leistungen des Subjekts aus. Konkret bedeutet dies, dass sie etwa bei der Beobachtung eines einzelnen Photons jegliche Aussage darüber vermied, was zwischen dessen Emission und Detektion geschieht. In diesem Sinne stellte die Wellenfunktion für sie weder die Flugbahn eines Teilchens noch die Ausbreitung eines Energiefelds dar, sondern war einfach ein mathematisches Werkzeug, das die **Wahrscheinlichkeiten von bestimmten Messergebnissen** beschrieb. Viele Interpreten der Quantenmechanik sahen das zwar als einen erkenntnistheoretischen Rückschritt an, erblickten darin jedoch die sicherste Art der Vermeidung von Paradoxien.

Leider griff dieser Versuch der Problemlösung zu kurz. Denn das Denken lässt sich nicht per Dekret den Bezug von Beobachtungen auf ein ihnen zugrunde liegendes Objekt verbieten. Besagtes Objekt wurde daher sehr schnell wieder durch verschiedenste bizarre Vermutungen in die Vorstellungswelt der Physiker eingeschleust und geistert darin seither in unterschiedlichsten clownesken Verkleidungen herum. Etwa in Gestalt eines Teilchens, das nicht nur **eine** Bahn sondern **alle** theoretisch möglichen Bahnen gleichzeitig durchläuft², oder gar als Partikel, das im Augenblick seiner Beobachtung zum Ausgangspunkt einer Unzahl neuer Universen wird, sodass dann jeder seiner vor der Beobachtung bloß möglichen Wege in einem andern Paralleluniversum Realität ist³.

Der berühmte Welle-Teilchen-Dualismus der Quantentheorie ist nur ein weiteres Beispiel für dieses die extrem zurückhaltende Kopenhagener Deutung negierende Objekt-Denken. Denn hier schließt man aus dem Umstand, dass uns ein und derselbe Gegenstand in Abhängigkeit vom jeweils gewählten Beobachtungsszenario einmal als Teilchen und ein anderes Mal als Welle erscheint, auf ein entsprechend **duales Sein** jenes Objekts. Dieser voreilige Schluss ist fatal, führt doch, wie sich im nächsten Abschnitt zeigen wird, die Denkfigur der zwei Seinsweisen ein und desselben Gegenstands bei der Interpretation von zentralen quantenphysikalischen Experimenten in ausweglose Sackgassen.

All diese die Kopenhagener Deutung **ontologisch überhöhenden** Interpretationsversuche erzeugen nicht nur ein bis zur Unkenntlichkeit verzerrtes Bild des wahrgenommenen Objekts. Denn sie verlieren darüber hinaus letztlich auch das wahrnehmende **Subjekt** aus den Augen: Man widmet sich zwar mit großer Aufmerksamkeit dem Beobachtungsprozess, versteht aber nicht, dass er sich widerspruchsfrei nur als **absichtsvolles Handeln** begreifen lässt. Stattdessen reduziert man ihn auf einen **dinglichen Vorgang**, an dem aus-

2 Vgl. Czasny, K., 2010 c, Seite 49 f.

3 Vgl. A.a.O., Seite 150 f.

schließlich Objekte beteiligt sind. Das beobachtende Subjekt ist für diese Betrachtung nur ein aus dem Zusammenspiel unendlich vieler Teilsysteme bestehendes quantenphysikalisches System höherer Ordnung – was wieder fatale Folgen hat. Wenn nämlich Quantensysteme erst im Akt der Beobachtung vom Zustand objektiver Unbestimmtheit ins reale Sein übertreten, dann müssen auch die als hochkomplexe Quantensysteme aufgefassten Beobachter*innen so lange im Zustand verschmierten Seins verharren, bis ihnen irgendeine 'höhere' Beobachtungsinstanz Realität vermittelt.

2. Eine andere Sicht auf das Doppelspaltexperiment

In meiner erkenntniskritischen Analyse der Quantenphysik versuchte ich aufzuzeigen, dass die erwähnten Schwierigkeiten mit der gedanklichen Konstitution des Quantenobjekts bei genauerer Betrachtung beherrschbar sind. Sie treten nämlich nur dann auf, wenn man **von vornherein** annimmt, mit einem Teilchen konfrontiert zu sein. Das Teilchen als solches ist in dieser Sichtweise ein immer schon vorweg konstituiertes Objekt, das über die im Teilchenbegriff implizierte Eigenschaft, eine Bahn zu besitzen, verfügt. Alle Interpretationsprobleme sind zwar erst auf einer **höheren** Konstitutionsstufe angesiedelt und betreffen bloß die Erscheinung bestimmter Merkmale jener immer schon konstituierten Bahn. **Ausgangspunkt** dieser Folgeprobleme ist jedoch stets die **vorgängige** Vorstellung, das eigentliche Objekt der Quantenmechanik sei ein **Teilchen**.

Es liegt daher nahe, schon auf jener untersten Stufe des Konstitutionsprozesses nach einer Form der Objektivierung zu suchen, welche jene Folgeprobleme gänzlich unterläuft oder zumindest mildert. Besagter alternativer Zugang zu den Quantenobjekten besteht in der Annahme, dass man es dabei **immer nur** mit **Energiewellen** zu tun hat, die ihrem Beobachter **unter bestimmten Beobachtungsbedingungen** als Teilchen **erscheinen** – ähnlich wie ein Würfel, den wir bei der Einnahme ganz bestimmter Blickwinkel als ein Quadrat wahrnehmen. Diese Sichtweise beseitigt nicht nur das Problem der vor ihrer Beobachtung nicht existierenden Bahnen. Sie umschifft darüber hinaus auch, wie die folgende Interpretation des berühmten **Doppelspaltexperiments** zeigen soll, das in unausweichliche Paradoxien führende Konzept eines dualen Seins der Quantenobjekte als Welle und Teilchen.

Beim genannten Experiment wird Licht durch zwei eng nebeneinander liegende Schlitze gesendet, was auf einer dahinter positionierten Wand zur Erscheinung eines streifenförmigen Licht-Schatten-Musters führt. Man interpretiert das als Folge einer Interferenz der an den beiden Spalten gebeugten Lichtwellen und sieht in diesem Ergebnis einen Beleg für die Wellennatur des Lichts. Die vermeintlich duale Natur des Lichts tritt bei diesem Versuch erst dann zutage, wenn man jeweils Lichtenergie im Ausmaß von nur einem einzelnen Photon durch den Doppelspalt sendet. Wird das viele Male hintereinander durchgeführt, dann gruppieren sich die Punkte des Auftreffens dieser Photonen am Detektor hinter dem Doppelspalt zu dem von der Standardvariante des Versuchs her bekannten Licht-Schatten-Muster. Wenn nun aber in einer dritten Versuchsvariante der Experimentator bei jedem der durch den Doppelspalt wanderenden Photonen misst, durch welchen der beiden Schlitze sein Weg führt, bilden die Punkte der Detektion an der Wand hinter dem Doppelspalt kein Detektionsmuster. Für die Vertreter der These vom dualen Sein des Lichts läuft

das Licht in der einen Versuchsvariante als Welle durch den Doppelspalt, während es bei der anderen Variante vom Experimentator durch seine Beobachtung im Zuge des Messversuchs zum Teilchen gemacht wird.

Und dann gibt es da auch noch jene weitere Variante dieses Versuchs, bei der das Licht vor dem Hintergrund der Dualitätsthese ein so verwirrendes Verhalten zeigt, dass etwa der Physiker Henry Stapp vom **zentralen Mysterium der Quantentheorie** sprach. Hier werden in einer ersten Versuchsreihe einzelne Photonen ohne Messung ihres Weges durch den Doppelspalt geschickt, was an der Hinterwand erwartungsgemäß wieder das bekannte Interferenzmuster ergibt. Bei einer zweiten Versuchsreihe ist dann einer der beiden Schlitze verschlossen, was zur Folge hat, dass die Detektionspunkte aller wieder einzeln abgesendeten Photonen nun kein Interferenzmuster bilden. Geht man von vornherein davon aus, dass es sich bei der durch die Versuchsanordnung geschickten Lichtenergie stets um einzelne **Teilchen** handelt, dann ist dieses Resultat tatsächlich äußerst rätselhaft. Denn in diesem Fall erhebt sich die Frage, woher das jeweilige Lichtteilchen bei seinem Flug durch den nicht abgedeckten Spalt weiß, dass der andere Spalt abgedeckt ist und es demzufolge **an allen Stellen** der Hinterwand landen darf (anstatt sich dabei auf die hellen Streifen des Interferenzmusters zu beschränken).

Die Ergebnisse dieser verschiedenen Varianten des Doppelspaltexperiments verlieren sofort ihren seltsamen bis hochmysteriösen Charakter, wenn man davon ausgeht, dass das Licht **immer nur als elektromagnetische Energiewelle** durch die Versuchsanordnung läuft. Das einzelne Photon ist dann ein elektromagnetisches Wellenpaket, das durch unsere Beobachtung seines genauen Weges am Doppelspalt nicht zu einem Teilchen wird, sondern bloß seine **Fähigkeit zur Interferenz mit sich selbst verliert**.⁴ Auch das bei nur einem einzelnen geöffneten Spalt durch die Versuchsanordnung wandernde Wellenpaket kann natürlich mangels Beugung durch einen zweiten Spalt nicht mehr mit sich selbst interferieren. Bei dieser Sicht der Dinge wird also die Nichtinterferenz hinter dem Doppelspalt nicht vorschnell als Beweis für das Vorliegen eines Teilchens interpretiert. Vielmehr sieht man in ihr nur einen Hinweis darauf, dass die nach wie vor im Spiel befindliche elektromagnetische Welle durch quantitative Änderung bestimmter Parameter gewisse vor der Messung vorhandene (und für ihre Wahrnehmung als Welle ausschlaggebende) Eigenschaften verloren hat.

3. Notwendige Modifikationen der klassischen Elektrodynamik

Selbst wenn wir dabei bleiben, dass das Licht eine reale Energiewelle ist und keine bloße Wahrscheinlichkeitswelle, die bei ihrer Beobachtung zu einem punktförmigen Teilchen kollabiert, müssen wir doch einige völlig neue empirische Befunde der Quantenphysik in unser Bild vom Licht integrieren. Es geht dabei vor allem um **drei notwendige Modifikationen** der in Gestalt von Maxwells Funktionsgleichungen vorliegenden klassischen Elektrodynamik.

4 Vgl. A.a.O., S. 36 ff. zum Scheitern aller Versuche einer die Interferenzfähigkeit nicht zerstörenden Messung des genauen Photonenwegs durch den Doppelspalt

Die erste dieser Modifikationen resultiert aus der Einsicht, dass das elektromagnetische Feld seine Energie nur in **diskreten Portionen** aufnimmt bzw. abgibt. Max Planck war bei seiner Entdeckung dieses Phänomens noch nicht bereit zu dieser radikalen Schlussfolgerung. Leichter fiel ihm die Annahme, dass das Licht selbst kontinuierlicher, also wellenförmiger Natur sei und die ‚portionierte‘ Aufnahme bzw. Abgabe von Energie ausschließlich aus bestimmten Eigenschaften der emittierenden bzw. absorbierenden Atome resultiere –ähnlich wie bei einer Suppe, die portionsweise mit dem Löffel ein- und ausgeschenkt wird.⁵ Erst spätere Experimente bewiesen glasklar, dass die **Quantenstruktur** der Aufnahme und Abgabe von Energie **ein Merkmal des elektromagnetischen Felds selbst** ist. Bei diesen Experimenten wird ein einzelnes Photon durch einen halbdurchlässigen Spiegel in zwei Teilstrahlen gespalten, die sich **beliebig weit** voneinander entfernen können. Fällt einer der beiden Teilstrahlen auf einen Detektor, wird stets die **Gesamtenergie** des Photons **augenblicklich** an den Detektor abgegeben, was bei einem kontinuierlichen Abfluss der Energie wegen der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts unmöglich wäre.⁶

Diese Experimente bringen nicht nur den Beweis, dass das elektromagnetische Feld durch ein in ihm selbst verankertes Muster des diskreten Energieaustausches gekennzeichnet ist. Sie machen darüber hinaus auch deutlich, dass es **ganzheitlich** reagiert. Zwischen den verschiedenen Punkten dieses sich ausbreitenden Feldes müssen somit **nichtlokale** (also vom räumlichen Abstand der Punkte unabhängige) **Korrelationen** bestehen, die auf **verschränkte**, von der klassischen Elektrodynamik noch nicht berücksichtigte Feldstrukturen verweisen.

Neben dem diskreten Energieaustausch und den ganzheitlichen Reaktionen des elektromagnetischen Energiefelds zwingt die **unvermeidliche Unschärfe** der quantenmechanischen Prognosen zu einer dritten Überformung der klassischen Elektrodynamik. Während aber die beiden erstgenannten Modifikationen eindeutig auf entsprechenden Strukturen des **Objekts** der Quantenphysik verweisen, wurzelt die notwendige Unschärfe primär in dem die Quantenphysik kennzeichnenden **Subjekt-Objekt-Verhältnis**. Ich versuchte in meiner Auseinandersetzung mit den erkenntnistheoretischen Problemen der Quantentheorie zu begründen, wieso wir es dabei mit einer **unvermeidbaren Unschärfe unseres Wissens** über das Geschehen im Objektbereich zu tun haben. Im Gegensatz dazu wollen die ontologisch überschießenden Interpretationen der Kopenhagener Deutung der Wellengleichung hier eine **objektive Unbestimmtheit** der von der Quantenphysik beobachteten Vorgänge erkennen.

4. Deutung der QED als modifizierte Elektrodynamik?

Auf diese unterschiedliche Sicht des Unschärfeproblems werde ich am Schluss noch genauer eingehen. Davor aber muss ich mein Verständnis des theoretischen Stellenwerts der drei erforderlichen Modifikationen der klassischen Elektrodynamik erläutern und anschließend darüber berichten, wie ChatGPT dieses Verständnis im Lichte der neueren Diskussionen zur Interpretation der Quantenmechanik beurteilt.

5 Vgl. A.a.O., S. 71 f.

6 Vgl. A.a.O., S. 72 f.

Ich beginne meine Erläuterung mit einer kurzen Erinnerung daran, dass die Quantentheorie im Verlauf des zwanzigsten Jahrhundert ausgehend von Schrödingers fundamentaler Wellengleichung das große Gebäude der **Quantenfeldtheorien (QFT)** errichtete. Diese bilden das **mathematische Gerüst** des sogenannten **Standardmodells**, welches seinerseits alle bekannten Elementarteilchen und Kräfte (mit Ausnahme der Gravitation) beschreibt. Ein wichtiges Teilgebiet der QFT ist die mit der Darstellung der elektromagnetischen Kraft befasste **Quantenelektrodynamik (QED)**. Der mathematische Formalismus dieses umfassenden Theoriegebäudes funktioniert beeindruckend gut und gestattet die Ableitung von Prognosen, die einen großen Teil des Geschehens in der Welt der Quanten mit höchster Präzision vorhersagen. Alle eingangs thematisierten Fragen der **verbalen Interpretation** der jenem Formalismus zugrunde liegenden Wellenfunktion sind aber nach wie vor offen. Damit ist auch völlig ungeklärt, welche Objekte die QFT eigentlich beschreibt, weshalb viele Physiker und Philosophen zur Beibehaltung der extrem vorsichtigen Interpretationshaltung der Kopenhagener Deutung tendieren. Für sie sind daher die mathematischen Feldkonstruktionen der QFT keine Abbilder von realen Feldern sondern bloße Prognoseinstrumente, die eine sehr präzise Beschreibung der Entwicklung der Wahrscheinlichkeit bestimmter Beobachtungen gestatten.

Als Nicht-Mathematiker hatte ich bei der seinerzeitigen Reflexion über die quantenphysikalischen Herausforderungen der Erkenntnistheorie nur sehr oberflächliche Kenntnis des hochkomplexen Formalismus der QED, aber klare Vorstellungen von dessen **Aufgabe**. Im Lichte meiner Interpretation des Geschehens beim Doppelspaltexperiment besteht sie darin, **die klassischen Funktionsgleichungen des elektromagnetischen Energiefelds so zu modifizieren,**

- dass sie einerseits die davor unbekannt Qualitäten jenes Energiefeldes widerspiegeln
- und andererseits die unvermeidliche Unschärfe unseres Erkennens seiner raumzeitlichen Entwicklung berücksichtigen.

Wie ich damals schrieb, erfüllt der Formalismus der QED die letztgenannte Funktion dadurch dass er „*die jeweilige Feldstärke im Unterschied zur klassischen Theorie nicht durch Zahlenwerte sondern durch Operatoren beschreibt. Das hat zur Folge, dass die Feldstärke keine ‚scharfen‘ Werte besitzt, sondern zu fluktuieren beginnt, also unbestimmt wird*“. Ergänzend stellte ich fest, dass es sich dabei um eine Unbestimmtheit handle, die aus der Sicht einer ontologisierend interpretierten QED eine Unbestimmtheit des Seins sei, aus meiner Perspektive „*jedoch als eine (prinzipielle!) Unbestimmbarkeit, im Sinne einer prinzipiellen Unerkennbarkeit der ‚scharfen‘ Werte der Feldstärken*“⁷ aufgefasst werden müsse.

5. Berührungspunkte mit realistischen Interpretationen der QFT

Die Bitte, meine Deutung der QED als modifizierter Elektrodynamik vor dem Hintergrund der neueren Diskussionen zur Interpretation des Gesamtgebäudes der Quantenfeldtheorie einzuschätzen, beantwortet ChatGPT mit der Auskunft, dass im näheren zeitlichen Umfeld meiner erkenntnistheoretischen Publikation zur Quantenphysik **realistisch-**

7 A.a.O., S. 74

feldtheoretische Interpretationen der QFT entstanden, die deutliche Berührungspunkte mit meinen Überlegungen zur QED zeigen. Der Chatbot bezeichnet diese realistischfeldtheoretischen Deutungen mit einer Kurzformel als QFT-Realismus und hebt folgende Unterschiede zur Kopenhagener Deutung der Quantenphysik hervor:

- Die Kopenhagener Deutung hat ein instrumentalistisches Verständnis der Wellenfunktion, sieht also in ihr bloß ein mathematisches **Werkzeug zur Beschreibung der Wahrscheinlichkeit von Messergebnissen**. Der QFT-Realismus interpretiert demgegenüber die von der Wellenfunktion gelieferten Beschreibungen als Darstellungen der **Zustände eines realen physikalischen Feldes**. Im Fall der QED handelt es sich dabei um das elektromagnetische Energiefeld.
- Die das Photon bildenden **Partialwellen** sind für die Kopenhagener Deutung bloße **Rechenbestandteile der Wahrscheinlichkeitsamplitude** seiner Beobachtung. Der QFT-Realismus deutet dagegen die Partialwellen des Photons als **Feldmoden des elektromagnetischen Kraftfelds**. Im Zuge des Emissionsvorgangs findet aus seiner Sicht eine lokale Energieübertragung von einem Atom auf jenes Feld statt, welche viele seiner Moden kohärent anregt. Diese kohärent angeregten Moden bilden sodann das Photon als ein reales Wellenpaket.

Hier zeigen sich laut ChatGPT **drei wesentliche Gemeinsamkeiten** mit meiner Vorstellung einer Modifikation der klassischen Elektrodynamik:

1. Auch für den QFT-Realismus beschreibt die Wellenfunktion keine bloße Wahrscheinlichkeitswelle, sondern ein **reales, raumerfüllendes Feld**, dessen verschiedene Anregungsmodi durch Operatoren dargestellt werden.
2. Die Eigenschaft dieses Feldes, Energie nur in **Quanten** aufzunehmen und abzugeben, wird bereits durch die Grundstruktur der QFT abgebildet (Fock-Raum⁸, Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren)
3. Der Gesamtzustand jenes Feldes ist für die QFT (und daher auch für deren realistischfeldtheoretische Deutung) **holistisch**: Ein einzelnes Photon existiert nicht unabhängig von diesem Gesamtzustand; Superpositionen und Verschränkung sind Eigenschaften des Gesamtfeldes.

Neben diesen Übereinstimmungen gibt es aber laut ChatGPT mindestens eine mathematisch-konzeptuelle Eigenheit des gesamten Theoriegebäudes der QFT, die in so starkem Kontrast zum Ansatz der klassischen Elektrodynamik steht, dass man bei der QED nicht von einer bloßen Modifikation der klassischen Elektrodynamik sprechen sollte. Denn bei einer solchen Modifikation wären die Grundgrößen des Modells immer noch **Funktionen**. Diese würden sich von den Funktionen der klassischen Elektrodynamik nur dadurch unterscheiden, dass sie Felder mit zusätzlichen quantenhaften und ganzheitlichen Modifikationen darstellen können. In der QFT dagegen sind diese Grundgrößen keine Funktionen sondern sogenannte **operatorwertige Verteilungen**. Während man bei Verwendung des Funktionskonzepts stets nur eine wohldefinierte Funktion über dem Raumzeitpunkt darstellt, kann das mathematische Konzept der Verteilung auch mit unregelmäßigen oder

⁸ Die QFT beschreibt die Zustände von Teilchen als Vektoren. Und der Fock-Raum ist die dafür von ihr genutzte Sonderform eines Vektorraumes mit unendlich vielen Dimensionen.

singulären Funktionen arbeiten, indem es sie durch die Abbildung von Testfunktionen auf eine Zahl oder auf einen Operator beschreibt. Letzteres geschieht im Fall der operatorwertigen Verteilung. Dadurch wird es möglich, lokale Feldoperatoren wie die Stromdichte, die nicht überall wohldefinierte Funktionen sind, korrekt zu beschreiben und zugleich die Quanteneffekte des Vakuums (Nullpunktfuktuationen, Casimir-Effekt, usw.) in einer kontrollierten mathematischen Form zu analysieren.

6. Die Modellierung ganzheitlicher Quantenphänomene durch die QFT

Die Vertiefung der Diskussion mit dem Chatbot über Berührungspunkte und Unterschiede zwischen meiner Interpretation der QED und deren Deutung durch den QFT-Realismus brachte dann eine weitere gravierende Differenz zwischen beiden Sichtweisen an den Tag. Es geht dabei um die Frage, wie der QED-Formalismus den ganzheitlichen Charakter der uns in der Quantenwelt begegnenden Verschränkungsphänomene modelliert. Ich hatte, wie bereits erwähnt, in meiner seinerzeitigen Publikation zur Quantentheorie die Ansicht vertreten, der QED-Formalismus modifiziere die Grundgleichungen der klassischen Elektromechanik dahingehend, dass sie auch die **ganzheitlichen Reaktionen des elektromagnetischen Feldes** darstellen können. ChatGPT machte mir nun aber klar, dass sowohl die klassische als auch die realistischen Interpretationen der QED deren Umgang mit den ganzheitlichen Quantenphänomenen auf eine entscheidend andere Weise deuten. Und der Chatbot ließ auch keinen Zweifel daran, dass diese Deutungen die tatsächlichen Funktionen jenes Formalismus besser treffen als meine Sicht, die eher so etwas wie **das Programm einer alternativen QED** sei.

Sowohl die klassische als auch die realistischen Interpretationen der QED unterscheiden streng zwischen jenen Aspekten des QED-Formalismus, welche die **Dynamik** des elektromagnetischen Feldes modellieren und jenen Aspekten, welche den jeweils aktuellen **Zustand** dieses Feldes darstellen. Die Modellierung der Dynamik des Feldes durch die QED ist **streng lokal**, da alle Wechselwirkungen dieses Feldes durch Feldoperatoren beschrieben werden, die sich gemäß den quantisierten Maxwell-Gleichungen kontinuierlich und lokal entwickeln. **Ganzheitlich** ist bloß der quantenfeldtheoretische Zustand. Er beschreibt aber nicht das physikalische Geschehen selbst, sondern nur die **Korrelationen** zwischen den an verschiedenen Orten des Geschehens zu erwartenden Messergebnissen.

Der Chatbot erläutert dies etwas näher am Standardbeispiel der Polarisationsverschränkung zweier Photonen A und B: Vor der Messung der Polarisation von Photon A beschreibt die QED einen verschränkten Zustand des Feldes, der nicht-lokale Korrelationen beinhaltet, aber keine lokalen Polarisationswerte. Denn die sind uns zu diesem Zeitpunkt nur als Überlagerungen möglicher Messergebnisse bekannt. Bei der Messung an Photon A findet dann eine lokale Wechselwirkung zwischen dem Messgerät und dem Feld statt, deren Resultat zufällig ist. Danach beschreibt die QED den Zustand des Feldes unter der Bedingung dieses Messergebnisses neu. Was die Messung der Polarisation bei Photon A **augenblicklich** auslöst, ist also **keine physikalische Fernwirkung** auf die Polarisation von Photon B im Rahmen einer ganzheitlichen Veränderung des elektromagnetischen Feldes, sondern bloß **ein Update unserer Zustandsbeschreibung** des Feldes.

Hier wird **zweifache kategoriale Spannung** der gesamten QFT deutlich, in deren Zentrum Ihr Zustandsbegriff steht:

- Er muss er **vermitteln** zwischen dem auf lokale Wechselwirkungen abstellenden Kausalmechanismus dieser Theorie und ihrer den ganzheitlichen Charakter der Quantenphänomene abbildenden Korrelationsstruktur. Damit ist der quantenmechanische Zustand einerseits ganzheitlich real, andererseits unbeteiligt am kausalen Geschehen.
- Darüber hinaus handelt es sich bei ihm um eine epistemische Kategorie, die den **Stand unseres Wissens** über das Feld beschreibt, zugleich aber wesentlich mit der Beschreibung von dessen realer Dynamik verknüpft ist. Denn jede unserer Messungen löst eine sprunghafte Änderung unseres Wissens über das Feld aus, welcher der Formalismus der QFT durch einen entsprechenden Sprung zu einer neuen Zustandsbeschreibung Rechnung trägt.

Die erste dieser beiden inneren Spannungen der QFT und ihres Zustandsbegriffs führt bei den realistischen Interpretationen dieser Theorie zur Entstehung eines ganzen Spektrums von verschiedenen akzentuierten Spielarten des QFT-Realismus. Sie unterscheiden sich unter anderem in ihrer Einschätzung der Frage, in welchem Ausmaß und auf welche Weise dem vom Einfluss auf die Dynamik des Feldes ausgeschlossenen quantenmechanischen Zustand überhaupt Realität zukommt. Die zweite, auf den epistemischen Stellenwert des Zustandsbegriffs bezogene kategoriale Spannung der QFT dagegen führt zu einem uneinheitlichen und immer wieder auch **unsauberen** Umgang mit dem Zustandsbegriff. ChatGPT spricht davon, dass der Zustand „*manchmal ein ontischer Feldzustand, manchmal ein epistemischer Dichteoperator (und) manchmal eine konditionierte Erwartung*“ ist, wobei diese Ebenen „*oft in einem Atemzug genannt*“ werden.

7. Eine alternative Modellierung der Ganzheitlichkeit

Die im vorangehenden Abschnitt zusammengefassten Informationen des Chatbots über die Art des Umgangs der QFT mit dem ganzheitlichen Charakter der Quantenphänomene widersprechen meiner seinerzeitigen Vermutung, dass der Formalismus jener Theorie **ganzheitliche Reaktionen des realen Feldes** darstelle. Sie zeigen aber zugleich auf, dass der von der QFT praktizierte Umgang mit dieser Ganzheitlichkeit zu tiefgreifenden Widersprüchen und Problemen führt. Es ist deshalb reizvoll zu überlegen, ob man nicht eine Theorie formulieren könnte, die genau das liefert, was ich mir seinerzeit fälschlicherweise von der QFT erwartete: eine Darstellung der ganzheitlichen Reaktionen des realen Feldes, im Fall der QED also des elektromagnetischen Feldes. Diese ‚alternative QFT‘, würde keine konkurrierenden Vorhersagen machen, sondern wäre bloß eine Rekonstruktion der begrifflichen Architektur der QFT, die Unschärfe als Erkenntnisproblem und nicht als Seinsstruktur begreift und Ganzheitlichkeit als ontische Nichtlokalität ohne Fernwirkungen konzipiert. ChatGPT führte dieses Gedankenspiel für mich durch, und ich kann daher hier eine stichwortartige Zusammenfassung seiner Ergebnisse präsentieren.

Zentraler Schritt beim Entwickeln einer solchen alternativen QED wäre die Etablierung einer klaren Trennung zwischen Feldontologie und Zustandsbeschreibung.

In der QED:

- Das Feld beschreibt ein lokales, dynamisches Objekt
- Der Zustand beschreibt eine ganzheitliche Struktur, die irgendwo zwischen dem Objekt und unserem Wissen von ihm angesiedelt ist

In der alternativen QED:

- Das elektromagnetische Feld selbst trägt die ganzheitliche Reaktionsfähigkeit
- Der Zustandsbegriff bezieht sich nur mehr auf unser Wissen vom Feld

Dieser zentrale Schritt hat mindestens **drei Implikationen**:

1. Aufgeben der ontologischen Funktionen des Zustandsbegriffs

Die QED:

- benötigt Zustände als globale Träger von Korrelationen,
- ohne ihnen physische Wirksamkeit zuzugestehen.

Die alternative QED:

- verortet ganzheitliche Korrelationen nicht mehr im Zustand, sondern im Feld
- Konsequenz: Der Zustand bekommt einen rein epistemischen Stellenwert, während die Ontologie vollständig dem Feld zugeschlagen wird. Damit entfällt jene kategoriale Doppelrolle des Zustands, die größte Probleme bei allen Deutungen macht.

2. Modifikation (nicht Abschaffung) der lokalen Kausalität

- Lokale Wechselwirkungen bleiben lokal beschreibbar,
- Aber das Feld besitzt globale Dispositionsstrukturen, die nicht als dynamische Signalübertragung verstanden werden.
- Das bedeutet:
 - Keine Signalübertragung mit Überlichtgeschwindigkeit,
 - aber eine **ontisch nicht-separierbare Feldstruktur**.
- Hier liegt der entscheidende Unterschied zur QED:
 - Die QED erlaubt Nicht-Separierbarkeit nur **beschreibungsseitig**
 - Die alternative QED erlaubt sie **ontologisch**

3. Neuinterpretation von Verschränkung

- In der QED:
Verschränkung = Eigenschaft des Zustandsraums
- In der alternativen QED:
Verschränkung = Manifestation einer **ganzheitlichen Feldkonstitution**

Das ist keine Zusatzhypothese, sondern eine Verschiebung der Erklärungsebene:

- von der formalen Zustandsstruktur
- zur realen Feldstruktur.

Damit werden die Bell-Korrelationen ⁹erklärt ...

- durch reale Ganzheitlichkeit
- statt durch epistemische Nicht-Separierbarkeit.

⁹ Die Bell-Korrelationen beziehen sich auf die extrem starken, nicht-lokalen Zusammenhänge zwischen den Messergebnissen verschränkter Quantenteilchen, die durch die Bellsche Ungleichung mathematisch beschrieben werden.

Zusammenfassend fällt ChatGPT ein **zwiespältiges Urteil** über die eben umrisshaft skizzierte alternative QED:

- Dieser Ansatz sei „**philosophisch überzeugend**“, weil er „*erkenntnistheoretisch sauberer*“ argumentiere als die QED. Er löse nämlich deren innere Spannung, indem er den Zustandsbegriff eindeutig auf der Seite unseres Wissens vom Feld positioniere und die „*Ganzheitlichkeit dort verortet, wo sie sich phänomenologisch zeigt: im Feld selbst*“.
- Zugleich sei dieses Projekt einer alternativen QED aber „**physikalisch extrem anspruchsvoll**“ (was ich wohl als eine freundliche Formulierung für „*praktisch kaum durchführbar*“ zu verstehen habe).

In der Folge spricht der Chatbot dann nicht nur einige der von einer solchen Theorie zu bewältigenden Hürden konkret an. Er liefert darüber hinaus auch eine grobe Skizze ihrer formalen Struktur und zeigt auf, wo genau sie zentrale QFT-Begriffe (Operatoren, Algebren, Vakuum) umdeuten müsste. Diese Ausführungen gehen aber schon so tief in die mathematischen Grundlagen der Quantenmechanik hinein, dass ich sie nicht mehr kontrollieren kann, weshalb ich sie hier auch nicht dokumentiere.

8. Transzendental-pragmatistische versus realistische Deutungen

Nachdem am Beginn dieses Textes von meiner transzendental-pragmatistischen Kritik an der physikalischen Ontologie die Rede war, mögen die im vorangehenden Abschnitt nicht zu übersehenden Anleihen beim Sprachspiel der Ontologie verwundern. Um diese scheinbare Inkonsistenz aufzulösen, ist nun eine Erläuterung zum transzendental-pragmatistischen Zugriff auf das Ontische einzuschieben.

Für realistisch positionierte Physik-Philosophen und jeden im Modus des Alltagsbewusstseins operierenden Physiker, haben ‚Felder‘, ‚Teilchen‘, ‚Strukturen‘ oder ‚Zustände‘ den Stellenwert von etwas Seiendem, das es einfach gibt und das als solches von der Wissenschaft möglichst präzise abzubilden sei.

Die transzendental-pragmatistische Perspektive versteigt sich **nicht** zu einer vollständigen Zurückweisung dieser Position durch Leugnung eines uns gegenüber stehenden Seins. Sie beharrt aber darauf,

- dass das an sich vorhandene Sein uns **prinzipiell nie** ungebrochen zugänglich ist,
- weshalb die Aussage, dass etwas ‚sei‘, immer eine vorläufige, gleichsam **eingeklammerte** Annahme bezeichnet, die nur so lange gilt, bis sie durch das **Scheitern** eines an ihr orientierten Handelns widerlegt wird.

Auch die Vorstellung, diese Vorläufigkeit alles Wissens sei Folge einer **fortschreitenden Annäherung** an jenes an sich gegebene Sein, weist der transzendente Pragmatismus als **zu simpel gedacht** zurück. Denn er weiß, dass das Erkennen keine sich selbst genügende Veranstaltung ist, die das Ziel verfolgt, ein immer genaueres Bild vom Sein zu erzeugen. Wissen hat aus pragmatistischer Perspektive die Funktion der Orientierung des gesellschaftlichen Handelns, weshalb die Dynamik des Erkennens primär durch sich ändernde Orientierungsanforderungen jenes Tuns bestimmt ist. Da sich unser Handeln kontinuierlich zu immer neuen Formen der kollektiven Praxis weiter entwickelt, wird auch unser

Bild vom Sein immer vielschichtiger und umfassender. Dass es dadurch aber dem an sich vorhandenen Sein näher kommt, ist eine Vorstellung, die einerseits prinzipiell nicht beweisbar ist und andererseits nur von der Reflexion auf die enge funktionale Bindung des Erkennens an das Handeln ablenkt.

Realitätsannahmen mit immer bloß temporärem Stellenwert sind nicht nur bei der Orientierung unseres Handelns unerlässlich. Sie spielen auch eine wichtige Rolle bei allen transzendentalen Analysen der Konstitution von Erfahrungen. Denn auch diese Analysen müssen bei ihrer Beschreibung des jeweils erfahrungskonstitutiven Handelns vorübergehend eine realistische Haltung einnehmen, welche die Umstände, unter denen dieses Handeln stattfindet und die Resultate, die es erzeugt, als ein bis auf Weiteres nicht problematisiertes Sein auffasst. Wenn ich also zum Beispiel beschreibe, wie dem Beobachter das elektromagnetische Kraftfeld bei bestimmten Arten seines Beobachtungshandelns als Welle und bei anderen Arten des Beobachtungshandelns als Teilchen erscheint, dann gehe ich vorübergehend davon aus, dass so etwas wie elektromagnetische Kraftfelder existieren. Zugleich bin ich mir aber bewusst, dass diese Existenzannahme bloß als Resultat eines ganz bestimmten erfahrungskonstitutiven Handelns verstanden werden muss und eines Tages womöglich nicht mehr aufrecht zu erhalten sein wird.

Kurz gesagt: Im Kontext von transzendental-pragmatistischen Analysen ist die ontische Rede nur ein methodisches Vehikel und **kein metaphysisches Commitment**.

Das ‚Sein an sich‘ ist aus dieser Perspektive ein bloßer **Grenzbegriff**. Denn es ist nicht positiv bestimmbar, sondern **zeigt sich uns nur negativ als Widerstand** gegen falsche theoretische Vorstellungen, indem es

- fehlerhafte Prognosen zum Scheitern bringt,
- unangemessene Modelle ins Leere laufen lässt
- und interpretative Überdehnungen sichtbar macht.

Das Bindeglied zwischen dem sich stets nur mit Widerspruch zu Worte meldenden Sein und unserem physikalischen Erkennen ist die **gesellschaftliche Praxis**. Denn die Erkenntnisse der Physik sind nur solange gültig, solange sie durch ihre prognostischen Qualitäten den Erfolg unseres technischen Handelns sichern. Sie werden ersetzt, wenn der Wandel der gesellschaftlichen Praxis neue Technologien hervorbringt, die ihrerseits

- die Beobachtung bisher unbekannter Naturerscheinungen ermöglichen,
- und dadurch zur Entstehung neuer Fragestellungen führen,
- deren Beantwortung nur im Rahmen neuer Theorien möglich ist.

Physik ist damit für die transzendental-pragmatistische Position **kein passiver Spiegel des Seins**, sondern ein hochdynamischer, prinzipiell niemals abgeschlossener Prozess der Erfahrungsbildung, in dem Modelle als Werkzeuge fungieren, die uns praxistaugliche Bilder der Natur zeigen.

9. Unscharfes Erkennen versus unbestimmtes Sein

Wie bereits angekündigt, gilt es nun abschließend auf das für die Quantenphysik zentrale Thema der Unbestimmtheit bzw. Unschärfe einzugehen. In meiner Publikation aus dem Jahr 2010 kam ich dabei kurz zusammengefasst zu folgendem Ergebnis:

Einerseits hielt ich fest, dass die Quantentheorie ausgehend von Heisenbergs Feststellung einer unvermeidlichen **Unschärfe unserer Messungen** an Teilchen sehr rasch in einen Diskurs über eine **an sich gegebene Unbestimmtheit** jener Teilchen gekippt war. Die konstruktiven Besonderheiten des quantentheoretischen Formalismus, die ursprünglich bloß jener Messproblematik Rechnung tragen sollten, werden seither meist als Abbild einer Unbestimmtheit des Seins missverstanden.

Andererseits zeigte ich auf, dass es ausgehend von meiner Interpretation des Photons als einer teilchenartigen Erscheinung des elektromagnetischen Feldes möglich ist, die bei der Beobachtung des Photons vermeintlich auftretenden Unbestimmtheitsphänomene wieder bloß als **unvermeidliche Unschärfen** unserer Beobachtung zu verstehen.

9.1 Drei Aspekte der Unschärfe

Wie ich 2010 ausführte, ist bei dieser Rückstufung eines ontologisch überschießenden Unbestimmtheitsurteils in eine Aussage über unüberwindbare Erkenntnisschranken das Zusammenspiel von **drei Aspekten der Unschärfe** zu beachten:

1. Der MESSASPEKT der Unschärfe

Er beinhaltet die allseits bekannte, von Heisenberg als Unschärferelation thematisierte **Störungsproblematik** (Messinteraktion mit dem zu beobachtenden Teilchen ändert dessen Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung; je genauer die Messung, desto größer die Störung)

2. Der FORMASPEKT der Unschärfe

Er ist unabhängig von dieser Störungsproblematik und resultiert aus dem Umstand, dass unterschiedliche raum-zeitliche Anregungsmuster des elektromagnetischen Energiefeldes (also unterschiedliche Formen der elektromagnetischen Energiewelle) zu jeweils unterschiedlicher, aber immer komplementärer Größe der Streuung der Messwerte bei nicht-kommutierenden ¹⁰Observablen (Ort-Impuls, Energie-Zeit) führen. Der Formaspekt begründet damit die **komplementäre** Struktur der Unschärfe. Da dieser Aspekt des Unschärfeproblems weniger bekannt ist, möchte ich ihn hier am Beispiel der Messung von Ort und Impuls eines einzelnen Photons etwas näher erläutern, wobei ich meine Publikation aus dem Jahr 2010 zitiere:

Um zu verstehen, wieso unterschiedliche Formen der elektromagnetischen Energiewelle zu jeweils unterschiedlichen, aber stets komplementären Größen der Streuung der Ergebnisse dieser Messung führt, muss man sich folgendes vergegenwärtigen: Die dem einzelnen Photon zugrunde liegende Energiewelle lässt sich *„mathematisch stets als ein ganzes Paket von einander überlagernden Partialwellen mit jeweils konstanter Frequenz und Ausbreitungsrichtung (ausgedrückt durch den Wellenvektor) beschreiben Wenn besag-*

¹⁰ Bei zwei nicht kommutierenden Observablen A und B ist die Reihenfolge der Messungen nicht gleichgültig. Beginnt man mit der Messung von A, erhält man im Allgemeinen ein anderes Ergebnis als bei einem Beginn mit der Messung von B.

te Partialwellen sehr unterschiedliche Frequenzen und Ausbreitungsrichtungen besitzen, dann ist das aus ihnen zusammengesetzte Wellenpaket - entsprechend dem schon von der klassischen Physik entdeckten Modus der Überlagerung von Wellen jeglicher Art - schmal. Sind dagegen die Frequenzen und Ausbreitungsrichtungen der das Wellenpaket bildenden Partialwellen sehr ähnlich, so resultiert ein breites Wellenpaket.

*Dieser Zusammenhang zwischen der Schmalheit bzw. Breite des dem Photon entsprechenden Wellenpakets und dem Ausmaß der Heterogenität seiner Partialwellen ist die Basis des (komplementären) Zusammenhangs zwischen der jeweiligen Größe der Abweichungen der Orts- und Impulsmessungen von ihrem Mittelwert. Da nämlich bei einem schmalen Wellenpaket die Orte mit hoher elektrischer Feldstärke, also hoher Wahrscheinlichkeit des Ansprechens von Detektoren, sehr nahe neben einander liegen, ergeben sich nur sehr geringe Abweichungen der Ortsmessungen von ihrem jeweiligen Mittelwert. Zugleich resultieren aber wegen der in diesem Fall großen Heterogenität der Ausbreitungsrichtung der Partialwellen notwendig große Unterschiede bei den Impulsmessungen, da die jeweils gemessenen Photonenimpulse von den Ausbreitungsrichtungen dieser Partialwellen abhängen. Für breite Wellenpakete gilt sinngemäß das Gegenteil des eben Gesagten.*¹¹

3. Der MODELLASPEKT der Unschärfe

Er resultiert aus der Entdeckung, dass das elektromagnetische Energiefeld, dessen Ausbreitung man davor durch ein Kontinuumsmodell beschrieb, ein diskretes Muster des Energieaustausches aufweist. Dies zwang zur Entwicklung eines erweiterten Feld-Modells, das nun zwei nicht gänzlich kompatible Teil-Modelle mit einander kombiniert: Die **Ausbreitung** des Felds beschreibt man weiterhin durch ein Kontinuumsmodell, während **Energieaufnahme und -abgabe** durch ein diskretes Modell dargestellt werden. Das neue Gesamtmodell, dessen mathematischer Formalismus eine probabilistische Verknüpfung dieser beiden Teilmodelle umfasst, ist die QED. Der Modellaspekt der Unschärfe begründet damit die prinzipielle Unvermeidlichkeit der Unschärfe, ohne etwas über deren Ausmaß auszusagen.

9.2 Urteil des Chatbots über meine Deutung der Unschärfe

ChatGPT stimmt meiner Kritik an der auf dem Boden der Kopenhagener Deutung stattfindenden Ontologisierung des Unbestimmtheitsproblems zu. Diese Kritik formuliere „*in komprimierter Form genau die erkenntnistheoretische Schwachstelle (oder zumindest die erkenntnistheoretische Verschiebung) der Kopenhagener Deutung.*“ Unbestimmtheit werde dadurch „*zur Eigenschaft des physikalischen Seins, nicht mehr bloß unserer Beschreibung. Damit wird der Zufall objektiv: Er ist nicht mehr Zeichen unvollständigen Wissens, sondern Ausdruck der Natur selbst. ... Aus einem transzendentalen Problem der Erkenntnisbedingungen wird eine ontologische Aussage über die Welt an sich.*“

Auch meine über drei Teilstufen verlaufende **Rückstufung** der ontologischen Unbestimmtheit auf ein prinzipielles Erkenntnisproblem beurteilt der Chatbot sehr positiv:

11 Czasny, K., 2010 c, Seite 91.

- Die Dreiteilung des Unschärfe-Problems sei „*sachlich gut fundiert, erkenntnistheoretisch konsistent und physikalisch ernst zu nehmen. Sie trifft einen Punkt, der in der Standarddarstellung der Quantenmechanik häufig verdeckt bleibt: die systematische Verschränkung von Modellwahl, Zustandsform und Messpraxis.*“
- Der **Modellaspekt** der Unschärfe beschreibe zutreffend, dass das Unschärfe-Problem nicht primär aus einem ‘mysteriösen’ Naturverhalten folge, sondern aus einer historisch erzwungenen Modellhybridisierung. Die Charakterisierung der QED als Gesamtmodell, das zwei nur partiell kompatible Teilmodelle probabilistisch kopple, sei „*erkenntnistheoretisch präzise und trifft einen wunden Punkt der physikalischen Standardinterpretation.*“
- Besonders wichtig erscheint dem Chatbot, dass der Modellaspekt die Unschärfe strukturell, d.h. auf der Ebene der Modellarchitektur, begründe und nicht dynamisch.
- Der **Formaspekt** beschreibe „*zutreffend, dass die konkrete Ausprägung der Unschärfere Relationen nicht allein aus dem Operatorformalismus folgt, sondern aus der Gestalt des Zustands (Wellenpaketform, räumlich-zeitliche Struktur des Feldes):*
 - *unterschiedliche Ausbreitungsformen → unterschiedliche Varianzen,*
 - *bei nicht-kommutativen Observablen → strikt komplementäre Streuungen.*“

Damit sei die Unschärfe dort verortet, „*wo sie physikalisch tatsächlich entsteht: in der Wahl bzw. Präparation der Zustandsform, nicht in einer mysteriösen Messstörung.*“
- Besonders überzeugend sei die Feststellung, dass der Formaspekt die komplementäre Struktur der Unschärfe begründe. Das sei „*exakt der Punkt, an dem sich Heisenbergsche Unschärfe von klassischer Messungenauigkeit unterscheidet: Die Komplementarität ist zustandsabhängig, nicht bloß apparativ.*“
- Beim **Messaspekt** sei die Betonung seiner Unabhängigkeit vom Formaspekt wichtig, um möglichen Missverständnissen vorzubeugen. Denn hier habe man nach meiner Publikation aus 2010 einige neue Untersuchungen durchgeführt, die klar folgendes aufzeigen: „*Messfehler und Messstörung (sind) nicht trivial ..., aber sie ersetzen nicht die zustandsabhängige Unschärfe. ... Die Messung bestimmt nicht ob Unschärfe auftritt, sondern wie sie sich manifestiert.*“

9.3 Meine Deutung im Lichte neuer Studien

Meine Nachfrage zu den an dieser Stelle erwähnten neuen Untersuchungen beantwortet der Chatbot mit dem Hinweis auf „*Experimente, die klar zwischen Messstörung und Zustand-Unschärfe unterscheiden.*“ Ausgangspunkt dieser Experimente seien Arbeiten von Masanao Ozawa, in denen Heisenbergs Unbestimmtheitsrelation in eine präzisere Form gebracht werde. Diese beschreibe Störung und Messfehler getrennt und bringe dabei auch die zustandsimmanenten Streuungen (also meinen Formaspekt!) als Grund für diese Messfehler ins Spiel. Nach 2010 mit neutronenoptischen und photonischen Interferometern durchgeführte Experimente hätten dann gezeigt, dass selbst bei Minimierung des Störfaktors durch extrem schonende Messung die Streuung der Ergebnisse nicht unter das von der Quantenmechanik vorhergesagte Minimum sinkt. Dies stütze Ozawas formale Aussage, dass es eine zustandsimmanente Streuung gebe, die nicht aus dem Messprozess stammt.

In ihrer ontologischen Verblendung interpretieren die Physiker nun auch diese neuen empirischen Ergebnisse wieder als Bestätigung der von ihnen vermuteten **Unbestimmtheit des Seins der Teilchen**. So verkündet etwa Professor Yuji Hasegawa von der TU-Wien in einer Aussendung der TU-Wien mit Bezug auf das Ergebnis dieser Experimente: *"Die Unschärfe kommt nicht vom störenden Einfluss der Messung auf das Quantenobjekt, sondern von der Quantennatur der Teilchen selbst"* - worauf der Wissenschaftsjournalismus mit Begeisterung meldet: *„Die Natur ist unscharf“*¹²

ChatGPT bleibt demgegenüber auf dem Boden der Tatsachen und interpretiert die Ergebnisse dieser Experimente nüchtern:

„(a) Was empirisch gesichert ist:

- *In jedem quantenmechanisch präparierten Zustand ψ gibt es eine inhärente Streuung der möglichen Messwerte für inkommutierende Observablen.*
- *Diese Streuung zeigt sich experimentell auch dann, wenn man die Messung so schonend wie möglich gestaltet.*
- *Sie ist also nicht das Resultat einer technischen Störung.*

(b) Was nicht daraus folgt:

- *Dass das einzelne Teilchen ‚an sich‘ unbestimmt wäre.*
- *Oder dass es eine empirisch beobachtbare ‚ontologische Fluktuation‘ im Sein der Teilchen gibt.*

Die Experimente bestätigen lediglich die mathematische Struktur des quantenmechanischen Formalismus: Die Wellenfunktion enthält keine Information, die eine schärfere Bestimmung beider Größen gleichzeitig erlauben würde. Man kann also sagen: Die empirischen Befunde bestätigen die epistemische Grenze – sie ontologisieren sie aber nicht.“

Sie sind daher, ergänze ich selbst nun abschließend, völlig vereinbar mit der in meiner 2010 vertretenen Interpretation des Photons als einer unter bestimmten Beobachtungsbedingungen auftretenden Erscheinung des elektromagnetischen Energiefelds, der vor ihrer Beobachtung keinerlei bestimmtes oder unbestimmtes Sein zugesprochen werden darf.

Zitierte Publikationen

Czasny, Karl. 2010 a. *Erkenntnistheoretische Grundlagen der klassischen Physik*. Band I: *Klassische Mechanik und Relativitätstheorie*. München: GRIN Verlag

Czasny, Karl. 2010 b. *Erkenntnistheoretische Grundlagen der klassischen Physik*. Band II: *Vertiefung der philosophischen Reflexion*. München: GRIN Verlag¹³

Czasny, Karl. 2010 c. *Quantenphysik als Herausforderung der Erkenntnistheorie*. Freiburg im Breisgau: Verlag Karl Alber¹⁴

¹² Quelle: <https://sciencev2.orf.at/stories/1693282/index.html>

¹³ Eine zweite, leicht überarbeitete Fassung der beiden Bände I und II erschien 2014 im Disserta Verlag

¹⁴ Es handelt sich dabei um Band III meiner Studienreihe über *Erkenntnistheoretische Grundlagen der Physik*