

12. Jan. 11.24.56

RES110_Quantenmechanik

Willkommen zum Forschungspodcast der Helmholtz-Gemeinschaft.

Ich bin Holger Klein.

Ich bin mal wieder nach Hamburg gefahren zum Deutschen Elektronen-Synchrotron und treffe Robin Santra.

Der ist Leiter der Theoriegruppe am Center for Free Electron Laser Science und Professor für Physik an der Universität Hamburg.

Hallo Herr Santra.

Hallo.

Weiter steht da, eines seiner Forschungsgebiete ist die mikroskopische Charakterisierung quantenmechanischer Prozesse bei der Wechselwirkung von Röntgenstrahlen mit Atomen und Molekülen.

Das ist auch deutsch, aber ich habe nicht ein Wort verstanden.

Was tun Sie hier?

Ja, also was wir in einer Theoriegruppe machen, ist wir entwickeln mathematische Modelle.

Ja.

Und was das bedeutet ist, dass wir normalerweise als Ausgangspunkt die uns bekannten grundlegenden Gesetzmäßigkeiten der Natur, so wie sie das

Verhalten von Licht, wie sie das Verhalten von Elektronen, das Verhalten der Bewegung von Atomkernen betrifft, dafür gibt es grundlegende Gleichungen.

Aber die grundlegenden Gleichungen, die in der Quantenmechanik formuliert sind, die können wir im Allgemeinen, so wie sie dastehen, nicht lösen.

Das heißt, wir müssen Näherungsverfahren finden, um genährte Lösungen zu diesen Gleichungen zu finden.

Und die Hoffnung ist, dass diese Lösungen etwas mit dem tatsächlichen Verhalten von Atomen, Molekülen oder sonst was in der Natur zu tun haben.

Warum können Sie die Gleichungen nicht lösen?

Der Hauptgrund ist ein praktischer.

Also es hängt damit zusammen, dass die Gleichungen der Quantenmechanik sind Gleichungen, die man als Differenzialgleichungen bezeichnen.

Das sind genauer sogar noch...

Sie sehen meinen leeren Blick.

Ja, genau.

Also es hängt damit zusammen, wie viele Teilchen man beschreiben möchte.

Machen wir mal ein ganz einfaches Beispiel.

Das einfachste Atom, das man so landläufig kennt, ist das Wasserstoffatom.

Da haben Sie einen Kern, das Proton und einen Elektron.

Das flitzt da so drum rum.

Ja, und in der Quantenmechanischen Beschreibung müssen Sie eine sogenannte Wellenfunktion finden, die abhängig ist von drei Variablen, nämlich den drei Koordinaten, in denen Sie dieses eine Elektron im dreidimensionalen Raum finden können.

Es ist also ein Objekt, da müssen Sie drei Zahlen angeben können.

Und das ist relativ leicht machbar.

Im Fall vom Wasserstoffatom ist es sogar so, dass man ohne numerische Rechnung eine sogenannte analytische, geschlossene Gleichung angeben kann für das Verhalten vom Wasserstoffatom.

Für die sogenannten Lösungen der Schrödinger Gleichung der Quantenmechanik.

Also das kann man hinschreiben im Wasserstoffatom.

Fürs Helium bereits mit nur zwei Elektronen kennt man schon bereits keine solchen geschlossenen Lösungen mehr.

Man kennt nur noch numerische Approximationslösungen.

Das Verhalten der beiden Elektronen im Heliumatom würde es erforderlich machen, dass man eine Wellenfunktion angibt, die nicht von drei Koordinaten abhängig ist, also den drei Raumkoordinaten vom einen Elektron, sondern jetzt von sechs Koordinaten.

Nämlich den drei Koordinaten vom einen Elektron und den drei Koordinaten vom anderen.

Also das Problem ist folgendes.

Wir müssen verstehen, wo der Unterschied ist zwischen der klassischen Mechanik und der Quantenphysik.

In der klassischen Physik, kommen wir zum Wasserstoffatom zurück, würden wir zu jedem Zeitpunkt einfach nur angeben müssen, wo befindet sich das Elektron im dreidimensionalen Raum.

Das heißt, es ist möglich, diesem Elektron eine sogenannte Trajektorie zuzuordnen, die einfach sagt, wie bewegt sich das Elektron hier im Raum herum.

Zu jedem Zeitpunkt müssten wir deshalb, um zu sagen, was ist der Zustand des Atoms, mehr oder weniger nur angeben, x , y , z Position des Teilchens und noch die drei Geschwindigkeitskomponenten.

Also das bewegt sich halt in eine bestimmte Richtung mit einer gewissen Geschwindigkeit.

Das sind insgesamt nur sechs Zahlen, die wir angeben müssten, um den Zustand des einen Elektrons zu jedem Zeitpunkt anzugeben.

Sechs Zahlen zu jedem Zeitpunkt.

Zum späteren Zeitpunkt sind es dann andere Zahlen, aber zu jedem Zeitpunkt nur sechs Zahlen.

Die Wellenfunktion, die wir angeben müssen, der Quantenmechanik für das Elektron, erfordert, dass wir eine Funktion von drei Variablen angeben zu jedem Zeitpunkt.

Also um es mal zu visualisieren, stellen wir vor, die Wellenfunktion, das ist eine komplexe Funktion, das heißt, die ist komplexwertig, die nimmt die Werte komplexer Zahlen an, mathematischen komplexen Zahlen.

Und wenn man das Betragsquadrat, diese komplexen Zahlen nimmt, dann gibt

das einem die Wahrscheinlichkeit an, das Elektron an einer bestimmten Stelle zu finden.

In der klassischen Mechanik gibt es da keine Wahrscheinlichkeit.

Wir können sagen, das Elektron sitzt da an diesem Ort, den wir angeben, mit seiner Geschwindigkeit.

Diese sechs Zahlen, die wir einfach angeben, und da sind wir sicher, da ist das Teilchen.

Die Quantenmechanik sagt, wir können für das Elektron nur sagen, mit welcher Wahrscheinlichkeit es sich wo befindet.

Und die Information, mit welcher Wahrscheinlichkeit es sich an einem bestimmten Ort befindet, bekommen wir, indem wir diese Wellenfunktion nehmen, quadrieren und dann sagen, die hat einen bestimmten Wert an diesem Punkt.

Aber zu jedem Zeitpunkt müssen wir an jedem Punkt im Raum diesen Wert angeben.

Das heißt plötzlich, wir müssen nicht sechs Zahlen angeben, sondern streng genommen, wir müssen unendlich viele Zahlen angeben.

Ja, und das können Sie nur nähern.

Das können wir nur nähern.

Was wir also zum Beispiel machen könnten, praktisch gesehen, wir könnten sagen, da sitzt in der Mitte im Raum unser Kern.

Und wir sagen, sagen wir mal, wir führen ein Gitter ein, ein dreidimensionales Gitter, wo wir sagen, wir wollen wissen, mit welcher Wahrscheinlichkeit sitzt das

Elektron am einen Gitterpunkt oder am anderen Gitterpunkt.

Und das könnten wir mal ganz pragmatisch sagen, so ein typisches Atom hat vielleicht einen Durchmesser von ein paar Angströme, also so ein paar Zehntel von einem Milliarden Meter.

Und könnten wir vielleicht auf dieser Skala vielleicht so zehn Gitterpunkte in eine Richtung einführen, zehn Gitterpunkte in die andere und zehn in die dritte Richtung.

Das sind jetzt automatisch 1000 Gitterpunkte.

Und da haben wir jetzt nicht viel Gitterpunkte eingeführt, nur zehn pro Richtung.

1000 Gitterpunkte, wir müssten zu jedem Zeitpunkt angeben, an welchen Wert die Wellenfunktion an diesen 1000 Gitterpunkten hat.

Und wir haben ja schon eine Näherung gemacht, in der wir nur zehn Gitterpunkte pro Richtung eingeführt haben, also 10 mal 10 mal 10, das sind unsere 1000.

1000 Zahlen und nicht 6.

Bei klassischen Teilchen brauchten wir nur 6 Zahlen, hier brauchen wir schon 1000.

Wenn ich ein bisschen ambitionierter bin und sage, ich möchte aber in jede Richtung, ich möchte das ein bisschen feiner auflösen, dann würde ich vielleicht 100 Punkte pro Richtung nehmen, dann brauche ich schon 100 mal 100 mal 100, brauche ich eine Million Zahlen zu jedem Zeitpunkt.

Für ein Elektron?

Ein Elektron.

Und jetzt kommt der Punkt, wenn wir das gleiche Spielchen machen für das Heliumatom mit zwei Elektronen, dann müssen wir nicht nur die jeweils für die x-Komponente von Elektron 1, y-Komponente von Elektron 1 und z-Komponente von Elektron 1, diese 10 mal 10 mal 10, sondern noch mal 10 mal 10 mal 10.

Und nicht addiert, sondern multiplikativ.

Das heißt also, wenn wir 10 Gitterpunkte für Elektron 1 in x, y und z-Richtung machen und auch für Elektron 2, dann haben wir 10 mal 10 mal 10, 1000, mal 10 mal 10 mal 10, sind wir schon bei 10 hoch 6.

Also das heißt schon eine Million Gitterpunkte nur für zwei Elektronen, obwohl wir ganz schwach das ganze diskretisiert haben, also nur ganz wenig Information gesampelt haben.

Und wir lösen mit so einem schlechten Gitter die Gleichung auch nicht sehr akkurat.

Also da ist wahnsinnig viel Information, die man halten müsste im Prinzip und man hat von vornherein durch das Diskretisieren des Raums, was in der klassischen Mechanik so nicht notwendig ist, hat man Ungenauigkeit eingeführt in der Berechenbarkeit des Ganzen.

Und das wird immer schlimmer, wenn Sie mehr Elektronen haben, das fliegt Ihnen praktisch um die Ohren.

Und das ist der Grund, warum wir praktisch immer nur Näherungsverfahren, warum wir praktisch an Näherungsverfahren arbeiten.

Und ein anderes Problem halt, was gerade bei uns immer von Interesse ist, weil wir uns mit Licht-Materie-Wechselwirkung beschäftigen und ganz typischerweise, das Licht, das uns interessiert, ist kurzwellig.

Wir würden also sagen, dass die Photonenergien von so kurzwelligem Licht sind

hoch, da wenn ein Photon von so kurzwelligem Licht absorbiert wird, dann wird normalerweise ein Elektron im Atom oder Molekül ionisiert, das heißt rausgeschlagen.

Und die Beschreibung dann, wenn Elektronen auch rausfliegen können, bedeutet, dass ja das Elektron gar nicht mehr auf so einen kleinen Raum beschränkt ist.

Das heißt, Sie müssen Ihr Gitter vergrößern.

Sie müssen im Prinzip mit viel größeren Gittern arbeiten oder halt andere Tricks verwenden, um irgendwie das Ganze in den Griff zu kriegen.

Es sind also so viel, wie soll ich sagen, mathematisch-ingenieurwissenschaftliche Herausforderungen.

Wie kriegt man das quantenmechanische Problem in den Griff, um eine Aussage darüber zu treffen, was wirklich passiert?

Was machen Sie mit dem Wissen, das Sie da rausziehen?

Was habe ich davon zu wissen, wo die Elektronen so ungefähr sind?

Also es gibt da unterschiedliche Antworten dazu, aber in unserem ganz spezifischen Fall nutzen wir das ganz typischerweise dazu, um Aussagen darüber treffen zu können, was denn Materie macht, wenn man Materie in starken Lichtstrahl stellt.

Also wenn man schlichtweg verstehen möchte, geht die Materie in gewissem Sinn kaputt, geht die schnell kaputt?

Was heißt, dass sie kaputt geht?

Also was für Änderungen macht dieses Stück Materie?

Verschwundet ja nicht.

Verschwundet nicht, aber es explodiert typischerweise, explodiert das schnell?

Mit welcher Energie fliegen die Teilchen bei der Explosion raus?

Wie weit kann man vielleicht die Explosion bremsen?

Also zum Teil sind das praktische Fragen.

Manche von diesen Fragen kommen daher, dass man mittlerweile in der Lage ist, sehr, sehr intensive Röntgenlichtquellen zu bauen.

Die intensivsten Röntgenlichtquellen, das sind die sogenannten Freielektronenlaser.

Wir haben hier in Hamburg sowohl im extrem ultravioletten Bereich, Flash, und was jetzt dieses Jahr in Betrieb genommen wird, ist der European X-FL.

Das sind richtige Röntgenfreielektronenlaser, das bedeutet die Photonenergien sind nochmal einen Faktor 10 bis 100 größer als bei Flash.

Also jedes einzelne Photon hat mehr Energie, das es in Materie deponieren kann.

Es hat aber auch, und das ist der eigentliche Grund, warum man diese Röntgenfreielektronenlaser auch mag, nicht nur hat man zerstörerische Photonen, sondern die Wellenlänge des Röntgenlichts bei einem Röntgenfreielektronenlaser ist so im Bereich eben von den typischen Durchmesser von einem Atom oder den typischen Abständen von Atomen in Molekülen oder in Festkörpern.

Und der Grund, warum das witzig und nützlich ist, ist weil es eröffnet die Möglichkeit, die Struktur der Materie abzubilden mit sogenannten atomaren

Auflösungen, also die Atome sichtbar zu machen.

Das kann man auch ohne einen Freielektronenlaser machen, im Prinzip.

Der Speicherring Petra 3, den wir hier außerhalb des Fensters haben, da draußen sehen Sie ein Segment des Speicherrings, macht das auch.

Der verwendet Röntgenlicht und verwendet das Prinzip der Röntgenbeugung, das heißt sie haben Röntgenlichtwellen, die sie beugen an diesen kleinen Strukturen.

Und nur wenn die Wellenlänge so klein ist wie die Strukturen, an denen sie beugen, sehen sie einen Effekt in der Beugung.

Wenn Sie zum Beispiel langwelliges Licht nehmen und an Atomen beugen, dann sehen Sie gar nichts.

Das hat keine Quaste, die Musterbildung zur Konsequenz in der Beugung.

Aber mit Röntgenlicht können Sie beugen an den Atomen und dadurch die Position der Atome rekonstruieren.

Dadurch sehen Sie die atomare Struktur der Materie.

Aber auch nur die Atome, aber die Elektronen sehen Sie da noch nicht, ne?

Also ganz streng genommen sehen Sie mit dem Röntgenlicht eigentlich nur die Elektronen.

Achso.

Weil die Röntgenstreuung ist ein Prozess, der im gewissen Sinn die leichten Elektronen zum Schwingen bringt.

Die Kerne selber sitzen im Wesentlichen in Erdda und tun gar nichts.

Das heißt, was man wirklich bei Röntgenstreuung lernt über Materie, ist die Elektronendichteverteilung in Materie.

Und wenn wir sagen, dass wir dadurch die Atome sehen, dann ist das deshalb, weil typischerweise da, wo die Kerne sind, sind mehr Elektronen.

Und es sind die Dichten dort höher und dort, wo wenig Dichte ist, ist irgendwo zwischen den Atomen.

Das heißt, Sie mutmaßen da sozusagen den Kern hin.

Ganz genau.

Indirekt.

Aber wenn Sie doch die Elektronen sehen können, warum gibt es das noch in der Theorie?

Also es wäre nicht einfach, es wäre eine Idiotenfrage wahrscheinlich, aber wäre es nicht einfach hinzugehen und zu sagen, ich gucke jetzt einfach nach, wo die Elektronen sind?

Ja, das ist keine falsche Frage, das ist eine total legitime Frage.

Das ist natürlich genau, was diese Anlagen machen.

Also wenn man zu Petra 3 geht und sein Material dorthin bringt, zum Beispiel ein Proteinkristall, also ein Kristall, der aus periodisch angeordneten Proteinen eines Typs besteht und man möchte die dreidimensional aufgelöste atomare Struktur des Proteins wissen, und würde man zu Petra 3 gehen, würde Röntgenbeugung daran machen und würde sich die Position der Atome bestimmen lassen.

Und das ist auch etwas, was die Theorie dem Experiment nicht abnehmen kann.

Das ist eine relativ schwierige Angelegenheit, die komplette Struktur eines Proteins theoretisch vorherzusagen.

Weil es gibt so viele Möglichkeiten, wenn das Protein mal mehr als 100 Atome hat, ich sage mal, ein typisches Protein, das von Interesse ist, wird wahrscheinlich Tausende, vielleicht sogar bis 100 Tausende von Atomen beinhalten, je nach Komplexität, zu bestimmen, wie man diese ganz, ganz vielen Atome relativ zueinander anordnen kann, damit man quasi die Grundzustandsstruktur bekommt.

Sie können sehen, im Sinne von Lego-Zusammenbasteln, Sie haben da ganz, ganz viele Möglichkeiten.

Die Anzahl der Möglichkeiten wächst so dramatisch schnell, dass wir im Allgemeinen nicht in der Lage sind, das Problem zu lösen.

Das heißt, das kann Theorie eigentlich nicht übernehmen.

Und da ist auch in dem Sinne nicht wirklich Konkurrenz.

Aber die Theorie kommt dann zum Tragen, wenn man zum Teil überhaupt verstehen will, was man da macht.

Also beispielsweise, der Freie-Elektronen-Laser, der sich unterscheidet eben von den Experimenten, die man bei Petra 3 machen kann, was ein dritter Generation Synchrotron-Speichering ist, kein Laser.

Der Laser erzeugt viel mehr Lichtintensität.

Und man möchte wissen, welche Veränderungen verruft denn so ein Röntgenlaser bei der Röntgenbeugung an der Struktur hervor, während man quasi die Messung macht.

Kann man verhindern, dass Änderungen durch den Messprozess induziert werden?

Und dazu muss man das verstehen, was man tut.

Man kriegt dann irgendein Bild, aber versteht man das Bild, macht das Bild Sinn, würden wir denken, dass wir Probleme haben bei der Bildgebung oder bei der Bildnahme oder sind da gar keine Probleme zu erwarten?

Das heißt, wir würden nicht unbedingt von vornherein die Struktur des Proteins vorhersagen.

Und wenn wir unsere Rechnung machen, machen wir das nicht unbedingt an den kompliziertesten aller Strukturen, sondern versuchen uns einfachere Moleküle anzugucken, um zu verstehen, was da passiert.

Und versuchen uns dann immer mehr an der Komplexität nach oben zu hangeln.

Aber wir versuchen quasi die grundlegenden Mechanismen zu quantifizieren und Erwartungen zu formulieren, was das für ein Experiment für Folgen hat.

Wie ist denn da so der normale Arbeitsablauf?

Sie sitzen den ganzen Tag hier und zerbrechen sich den Kopf, haben dann irgendwann ein Ergebnis und gehen dann runter zum X-Fell und sagen, hier, das müsste eigentlich passieren, jetzt dürft ihr es ausprobieren?

Es ist unterschiedlich.

Bei uns ist es sehr häufig so, dass wir wissen, wir müssen gewisse theoretische Simulationswerkzeuge entwickeln.

Und das machen wir weitestgehend unabhängig davon, was die Leute jetzt direkt

an den Maschinen, an Experimenten durchführen.

Wo wir also wissen, wir müssen einfach unser Werkzeug erweitern und dann haben wir entsprechend in der Arbeitsgruppe Leute, die für diese einzelnen Neuentwicklungen zuständig sind.

Häufig sind das Doktoranden oder es sind Leute, die bereits promoviert sind und als sogenannte Postdocs zu uns kommen.

Die arbeiten dann an dieser Weiterentwicklung.

Das ist sozusagen eine Sache und dann die andere Sache ist, dass entweder wir vielleicht interessante Effekte sehen, auf Konferenzen oder in Vorträgen im Haus erzählen, was wir da vorher sagen und dann wird das eventuell aufgegriffen vom einen oder anderen Experimentator.

Und die sagen dann, wir probieren das aus.

Und dann gibt es auf diese Weise eine Zusammenarbeit.

Das ist eine Form.

Die andere Form ist, dass ab und zu Experimentatoren auch schon zu einem Freielektronenlaser Daten genommen haben.

In ihren Daten halt irgendwas beobachten und die Laser, da sollte ich nachher nochmal darauf zurückkommen, aber die Freielektronenlaser bieten die Möglichkeit nicht nur Sachen kaputt zu schießen, sondern da ist auch ein Punkt, warum man die baut.

Das ist nicht primär, dass sie das Explodieren sehen wollen, auf diesen Punkt komme ich gleich zurück, aber die sehen dann Effekte und verstehen erstmal nicht, was es bedeutet.

Und von da aus können sie dann zurückrechnen?

Wir können dann uns die Situation theoretisch angucken, in unseren Modellen können wir Effekte ausschalten, weil wir haben ja alles unter Kontrolle und können schauen, was ist die Ursache für das, was man beobachtet und können dann eine Erklärung liefern.

Also es gibt so ein bisschen diese Kombination von Vorhersage und Inspiration von Experimenten und angefragt werden, können die mir da helfen, dass wir verstehen, was da im Experiment passiert.

Das ist eigentlich was, wo sie sich, also hier hängt so eine Tafel, da stehen ganz viele Buchstaben, ist das irgendwas mit Gleichungen drauf?

Ja.

Ist das was, was man alleine arbeitet oder ist das ein Teamwork, also stehen sie zu zweit vor so einer Tafel und schreiben da Gleichungen oder machen sie das alleine?

Also in meinem Fall, wenn was an der Tafel steht, dann sind da immer mindestens zwei oder mehr Leute vor der Tafel gestanden, weil ich dann typischerweise was diskutiere mit jemandem und die Tafel ist ein ganz gutes Medium, um wirklich Diskussionen durchzuführen, zu sagen, ah da muss man was ändern, das ist die Gleichung, die man wirklich braucht, wie lösen wir diese Gleichung.

Und das ist Teamwork, aber auch wirklich unsere Softwarepakete zu entwickeln, ist Teamwork.

Das sind manche der Teams, bei uns sind vielleicht dann in einem größeren Softwareprojekt vielleicht fünf Leute involviert, die dann verschiedene Teile des Softwareprojekts übernehmen, die dann zu einem Ganzen zusammengefügt werden müssen, die entweder am Prüfen von einem Teil sind oder am Weiterentwickeln von einem anderen und dann, es ist also sehr kollaborativ.

Jetzt reden wir schon seit 20 Minuten über das, was sie hier tun, dabei bin ich doch eigentlich gekommen, um mir von ihnen erklären zu lassen, wie das mit den Quanten geht.

Wenn sie mir, weil ich hab keine Ahnung, wenn sie mir erklären wollen, was Quantenmechanik, Quantentheorie, sie haben eben Schrödinger Gleichung gesagt, wo fangen sie an, sowas zu erklären?

Was sind eigentlich Quanten?

Also der Begriff der Quanten kommt historisch und auch immer noch anwendbar von der Tatsache her, dass in der Quantenmechanik die Bewegung gebundener Teilchen energetisch quantisiert ist.

Und was ich damit meine ist, jetzt kommen wir zu unserem Wasserstoffatom zurück.

Ja, das verstehe ich.

Beim Wasserstoffatom, da haben wir dieses schöne Bild, da fliegt ein Elektron irgendwie um einen Kern herum, wir denken da ganz gerne an ein Planet, der fliegt um eine Sonne herum.

Und wenn wir in der klassischen Mechanik an die Bewegung des Elektrons um den Kern uns diese Situation vorstellen und wir fragen, welche Energie kann denn ein Elektron haben, wenn es sich um den Kern herum bewegt?

Die Energie setzt sich zusammen aus der Bewegungsenergie, der kinetischen Energie und der potenziellen Energie, die von der Anziehung des Elektrons durch den Kern herrührt.

Diese beiden Energien zusammen bestimmen dann die Gesamtenergie des Elektrons.

Die klassische Mechanik würde sagen, dass die möglichen Zustände des Elektrons, sind wesentliche Zustände, wo das Elektron jede mögliche negative Energie haben kann, und zwar jede bis praktisch minus- und endlich, wenn nämlich das Elektron sich um einen ganz ganz kleinen Radius um den Kern herum bewegt, hat man ganz ganz viel negative potenzielle Energie.

Und wenn das Elektron im ganz ganz großen Radius um den Kern herum fliegt mit vielleicht relativ kleiner kinetischer Energie, kann es mit einer Energie etwa um die Null herum sich drumherum bewegen.

Also es gibt gebundene Bewegungen, gebunden heißt also das Elektron fliegt nicht weg, diese Version gibt es natürlich auch.

Da braucht man Beschleuniger für, glaube ich.

Nein, nein, wenn wir durch Licht das Wasserstoffatom ionisieren, brechen wir es auf und dann fliegt das Elektron weg.

Das ist der photoelektrische Effekt, den Einstein erklärt hat, wofür er seinen Nobelpreis bekommen hat, für seine Erklärung dieses Effekts.

Dann brechen sie auf und dann fliegt das Elektron weg.

Die gebundene Bewegung ist wo quasi das Elektron am Kern bleibt, in der Umgebung bleibt und die klassische Mechanik sagt, jeder Energiezustand mit Energien zwischen praktisch Null und wesentlichen Minus- und endlich sind klassisch erlaubt.

Es gibt immer eine klassische Lösung der Newton-Gleichung, die eine solche Bewegung beschreiben würde eines solchen Elektrons um einen Kern.

Die Quantenmechanik sagt, dass es nicht wahr ist.

Es gibt nur ganz diskrete, quantisierte Energie-Eigenzustände, die das Elektron haben kann, in denen sich das Elektron quasi stationär, es geht um die stationäre Bewegung, sozusagen klassisch gesprochen wie eine periodische Bewegung, es gibt nur in diesen diskreten Quantenenergien Zustände, mit denen sich das Elektron bewegen kann.

Das hat zum Beispiel relativ dramatische Konsequenzen dafür, wie wir zum Beispiel unsere Umgebung sehen.

Natürlich das was wir in der Umgebung sehen sind nicht Wasserstoffatome, das ist typischerweise andere Atome, zusammengefügt in Molekülen, in Festkörpern, aber diese Effekte, dass nur ganz spezifische Quantenzustände in Materie vorliegen, führen dazu, dass wenn sie vom zum Beispiel Quantengrundzustand von einem Material in den ersten angeregten Zustand gehen wollen, brauchen sie eine ganz spezifische Lichtenergie, um den Übergang zu induzieren.

Wenn sie nicht die passende Energie haben, passiert da nichts.

Und das ist mit ein Grund, ich würde sagen das ist der Hauptgrund, warum Materie verschiedene Materialien, verschiedene Farben haben.

Es hängt davon ab, welche Lichtwellenlänge, welche Photonenergien aus weißem Licht entfernt werden durch Absorption der Photon.

Werden eher rote Photon absorbiert, werden eher grüne Photon absorbiert oder werden eher blaue Photon absorbiert.

Jede Farbe des Lichts entspricht einer anderen Energie der Photon und je nach Energie können die einen unterschiedlichen Quantenabstand zwischen Quantenzuständen in der Materie überwinden.

Was bedeutet Quantenzustand?

Ja, was bedeutet Quantenzustand?

Das habe ich nicht kapiert.

Ja, das ist eine legitime Frage.

Die Frage ist also, was heißt überhaupt Zustand?

Stimmt.

Also Zustand wollten wir klassisch sagen, wenn wir sagen Zustand eines klassischen Teilchens heißt, wir müssen angeben können, wo ist es im dreidimensionalen Raum und wie schnell bewegt es sich.

Und im Prinzip, die klassischen Gleichungen der Natur, die Newton-Gleichungen, die brauchen nur diese Information zu jedem Zeitpunkt, um quasi, also sagen wir mal zum Zeitpunkt jetzt, wissen wir, da sitzt das Teilchen in diesem spezifischen Punkt im Raum, bewegt sich mit dieser Geschwindigkeit.

Diese Information reicht einer klassischen Mechanik, um mithilfe der Newton-Gleichung, wenn man die Kräfte auf das Teilchen kennt, die Zukunft des Teilchens vorherzusagen.

Man kann dann für alle Zeiten sagen, wo bewegt sich das Ganze hin.

Deshalb können wir auch relativ gut sagen, wie bewegen sich die Planeten um ihre jeweiligen Sternen herum.

Wir kennen natürlich vor allem aus unserem unmittelbaren Planeten-System die Planeten sehr gut.

Mittlerweile kennt man mehr Planeten, aber so im Detail verstehen wir am besten die Bewegung der Planeten um unsere Sonne herum.

Und diese Bewegung können wir sehr gut mit der klassischen Mechanik

beschreiben.

Wir können praktisch vorhersagen, wo sich die jeweiligen Himmelskörper befinden werden, aufgrund der Angabe, wo sie sich befanden zu nur einem Zeitpunkt.

Der Rest ist sozusagen vorhersagbar.

Die klassische Mechanik braucht nicht mehr.

Das heißt, die Angabe des Zustands in der klassischen Mechanik heißt eigentlich nur die Angabe, von wo sich Teilchen befinden und wie schnell sie sich bewegen.

Das ist es.

In der klassischen Mechanik hat man einen Begriff, der nennt sich Phasenraum.

Das ist eine Art abstrakter, multidimensionaler Raum, wo man sagt, der Zustand des Systems ist gegeben durch einen Punkt in diesem hochdimensionalen Raum.

Wenn Sie sich das nicht vorstellen können, ist das nicht schlimm, aber der Punkt ist, dass das sich einfach nur mit Position und Geschwindigkeit identifizieren lässt.

In der Quantenmechanik hat man ein noch viel abstrakteres Konzept.

Warum eigentlich?

Warum reicht Ihnen die Newton-Schiff-Physik nicht?

Weil wir mittlerweile lauter Phänomene kennen, wo wir mit der klassischen Mechanik nicht weit kommen.

Und da gehören insbesondere auch diese Effekte, dass wenn wir Atome mit Licht

bestrahlen, dass wir nicht Absorption von Licht kriegen bei beliebigen, kontinuierlich sich verändernden Lichtenergien.

Wir sehen nur bei ganz, ganz diskreten Farben, dass etwas Energie aufnimmt.

Wir sehen quasi, dass Atome nur in spezifischen, diskreten Paketen von Energie, Energie aufnehmen und abgeben können.

Und die ganze Quantenphysik hat praktisch mit Atomphysikexperimenten begonnen.

Wirklich wortwörtliche Experimente an Atomen.

Spektroskopische Experimente, das bedeutet, wo man Licht verschiedener Farben verwendet, mit diesem Licht Atome beleuchtet und guckt, bei welcher Farbe reagiert das Atom.

Da hat man festgestellt, unterschiedliche Atome, die haben wortwörtlich eine Art Fingerabdruck, einen Farbfingerabdruck, der ganz spezifisch ist für das Atom.

Und dann hat man versucht, mit klassischer Mechanik das zu verstehen.

Zum Beispiel hat man versucht, so etwas wie das Wasserstoffatom zu beschreiben, in dem man weiß, dass es diese Coulomb-Anziehungskraft zwischen Kern und Elektron gibt.

Es sind eine Teilchen positiv geladen, andere negativ, die ziehen sich an.

Dann hat man die Newton-Gleichung gelöst und hat festgestellt, da gibt es keinen spektralen Fingerabdruck.

Jede Energie in diesem Zustand, in diesem System ist möglich.

Man könnte auch nur ein bisschen Energie zuführen und man könnte dadurch

einen neuen Zustand des Systems erreichen, der klassisch erlaubt ist.

Aber experimentell nicht?

Sieht man das nicht.

Man beobachtet das nicht.

Das heißt, man hat da ein gutes Beispiel und damit hat, wie gesagt, die ganze Historie der Quantenphysik begonnen.

Immer wo man gesehen hat, klassische Mechanik war nicht in der Lage, das Verhalten zu beschreiben, hat man aufgegeben und hat dann festgestellt, man braucht eine neue Form von Mechanik.

Und die wurde dann erfunden, im Wesentlichen erst mal in einer Art ad hoc Variante, sprich mit viel Intuition und heute auch nicht mehr akzeptiert.

Das nennt man die alte Quantentheorie.

Da verstecken sich so Namen wie Niels Bohr dahinter.

Wenn man ab und zu in Lehrbüchern Elektronen so auf der Schiebplanetenbahn rumfliegen sieht.

Das Borsche-Atommodell.

Das Borsche-Atommodell.

Deswegen bin ich mal in Chemie sitzen geblieben, weil ich das nicht verstanden hatte.

Ja, aber das hat gute Gründe, weil das ist zum Beispiel nicht erklärbar.

Die Quantenmechanik hat nichts mit dem Borschen-Atommodell zu tun.

Bohr hat lediglich ein paar Postulate hingeschrieben, weil er...

Damit er überhaupt weiterrechnen kann.

Damit er weiterrechnen kann und dann hat man zum Beispiel, das hat man für das Wasserstoffatom angewandt und das hat auch irgendwie so ausgesehen wie das Experiment.

Und dann hat man die Borsche-Logik angewandt auf das Heliumatom, das hat schon überhaupt nicht mehr ausgesehen wie das Experiment.

Das heißt, das Borsche-Atommodell ist Betrug, aber es ist natürlich in dem Sinn, es zeigt wie die Geschichte sich auch erst mal entwickeln musste.

Die Leute kommen ja nicht irgendwie, heute wissen wir nicht und morgen wissen wir alles.

Das geht ja alles typischerweise ein Schrittchen, ab und zu auch ein Schrittchen zurück.

Es ist nicht alles geradlinig und man hat gesehen, irgendwo muss man die klassische Mechanik modifizieren.

Und im Wesentlichen wurden 1925 und 1926 zwei Wege zur Quantenmechanik aufgezeigt.

Der erste war von Heisenberg, 1925 und ein Jahr später, 1926 von Schrödinger.

Und das, was man heute als die Schrödinger-Gleichung bezeichnet, sind eigentlich zwei Gleichungen.

Der eine ist eine zeitabhängige und der andere eine zeitunabhängige

Schrödinger-Gleichung.

Die beruhen eben auf dieser Entdeckung der, wie wir heute sagen würden, korrekten Beschreibung der Quantenmechanik durch Schrödinger.

Die Beschreibung durch Heisenberg ist ebenfalls korrekt und man kann mathematisch zeigen, dass sie äquivalent ist zu der Beschreibung von Schrödinger.

Aber die meisten Leute kennen, gerade aus mehr Anwendungsfeldern wie der Chemie zum Beispiel, kennen meistens eher die schrödingerische Formulierung der Quantenmechanik.

Und in manchen Bereichen der Physik ist es auch der Fokus auf dieser schrödingerischen Formulierung.

Aber es gibt auch noch die heisenbergische Variante.

Aber die sind äquivalent, die lassen sich ineinander überführen.

Und das war dann der Startpunkt für Quantenmechanik, so wie wir es heute verstehen.

Stimmen diese Gleichungen denn?

Oder werden immer noch wieder Erweiterungen?

Weil letztendlich ist das ja auch eine Theorie.

Wird die noch erweitert oder haben wir die verstanden?

Also Sie.

Nein, es ist legitim, auch wir zu sagen.

Als Menschheit.

Als die Menschheit insgesamt, ja.

Also die Antwort dazu ist ein bisschen vielschichtig.

Die Frage ist ein bisschen, was an Quantenmechanik ist sozusagen das, was wir als essentiell empfinden an der Quantenmechanik.

Also zum Beispiel muss das Kraftgesetz zwischen Elektron und Proton genauso aussehen, wie wir es die ganze Zeit annehmen.

Vielleicht sieht es ja auf irgendeiner Skala, wenn man ganz nah am Proton ist, dann merkt man ja, das Proton ist kein Punktteilchen.

Aber wenn wir normalerweise Wasserstoff rechnen, behandeln wir in der Quantenmechanik den Kern, das Proton, als ob es punktförmig wäre.

Als ob die Ausdehnung des Protons nicht so wichtig wäre.

Heute kann man Messungen machen, die so präzise sind.

Die sehen diese kleinen Abweichungen in den Quantenzuständen, in diesen Quantenenergien, den Abständen zwischen Quantenzuständen, die sehen das mit so großer Präzision, dass man den Einfluss der Ausdehnung des Protons sehen kann.

Ist das jetzt aber ein Zusammenbrechen der Quantenmechanik von Schrödinger, nur weil man festgestellt hat, das Proton hat ein bisschen Ausdehnung, ist nicht nur ein Punktteilchen?

Ich würde sagen, nein, das ist eine Modifikation.

Es ist also nicht unbedingt das Grundgerüst der Quantenmechanik, das zusammenbricht.

Die schrödingerische Quantenmechanik, so wie er es hingeschrieben hat, ist eine Variante der Quantenmechanik, die wir heute als nicht-relativistische Quantenmechanik bezeichnen.

Aber die Logik der Quantenmechanik kann man auch erweitern auf relativistische Theorien.

Also Theorien, wo man akzeptiert, dass man die Postulate der speziellen Relativitätstheorie von Einstein erfüllen muss.

Hat man dann gesagt, die Konzepte der Quantenmechanik in einem konzeptionellen Sinn sind falsch?

Oder hat man festgestellt, ja, die Konzepte sind richtig, aber man muss halt sozusagen...

Wir brauchen noch eine Variable dazu.

Wir brauchen geeignete Modifikationen, aber das konzeptionelle Grundgerüst ist korrekt.

Selbst wenn man heute das Standardmodell der Elementarteilchenphysik betrachtet, das Standardmodell der Elementarteilchenphysik ist eine sogenannte relativistische Quantenfeldtheorie.

Das heißt, da haben sie die Relativistik drin, sie haben die Quanten drin und sie haben sogar noch etwas, was sie noch nicht drin hatten, nämlich eine Feldtheorie.

Aber im Konzept des Grundverständnisses der Quantenmechanik stellt man fest, dass die relativistische Quantenfeldtheorie verwendet die Grundkonzepte

dessen, was wir als Quantenmechanik bezeichnen, gegenüber dessen, was wir als klassische Welt bezeichnen.

Also was man meint, wenn man Zustand hat.

Was muss man angeben können?

Was bedeutet Determinismus?

In der klassischen Physik können wir sagen, das Teilchen ist da.

Vielleicht haben wir nicht genau genug gemessen, um es genau sagen zu können, da ist es.

Aber wir haben keinen Zweifel, es ist da.

Wohingegen beim Elektron im Wasserstoffatom, wenn das in seinem Grundzustand ist, das Atom, können wir nur prinzipiell sagen, dass es eine Wahrscheinlichkeit gibt, das Elektron ist da und wir sind nie sicher.

Und dann haben wir aber auch nicht die Meinung, das ist nur, weil wir nicht genau geguckt haben, sondern es ist etwas Fundamentales.

Da gibt es diese grundlegende Natur in der Quantenmechanik, die einen Mangel an Determinismus zum Ausdruck bringt.

Etwas Probabilistisches, etwas was Wahrscheinlichkeiten mit reinbringt, in einer Art und Weise, wie es es in der klassischen Welt nicht gibt.

Und dieses Determinismus gegenüber wahrscheinlichkeitsorientierter Theorie, Lösen von Gleichungen, die deterministische Vorhersagen machen gegenüber Gleichungen, die Schrödinger-Gleichungsartig sind, das ist so etwas Grundlegendes, was entkoppelt ist von den Details.

Und ich würde sagen, was diese grundlegende Unterscheidung angeht, gut, niemand wird jemals wissen, oder zumindest können wir nie sagen, das wird das Ende aller Weisheit sein, vielleicht muss man selbst diese grundlegenden Konzepte auch noch weiter ergänzen, das kann man nicht ausschließen.

Aber was nicht unwahrscheinlich ist, das sind die Details, also sieht die Kraft jetzt genau so aus, braucht man vielleicht noch ein weiteres Quantenfeld, oder ein paar weitere Quantenfelder, aber ist das ein Aufgeben der Quantenphysik als Konzept?

Ich glaube nein.

Im Moment sehen wir noch nicht, dass wir Quantenphysik und Quantenmechanik als Konzept für das Gebäude aufgeben müssten, soweit ich das überblicke.

Haben Sie eigentlich, wenn Sie über sowas sprechen oder über sowas nachdenken, Bilder im Kopf?

Also so wie zum Beispiel, das Wasserstoffatom, da flitzt halt so ein Elektronen rum, das ist halt so ein Bild, das ich in meinem Kopf weiterverarbeite.

Haben Sie sowas?

Ja, also das ist auch zum Teil ein bisschen gefährlich, weil wir ja häufig durch unsere Alltagserfahrung unsere Bilder prägen und die Quantenphysik hat ja so ein paar kuriose Eigenschaften.

Die Energiequantisierung ist nicht so kurios, es ist halt etwas, was man klassisch so nicht kriegt, aber es ist keine Kuriosität per se.

Man könnte es sich immer noch vorstellen, ich weiß zwar nicht warum das jetzt genau nur die Energie haben kann, aber bei genau der Energie flitzt es rum wie ein klassisches Teilchen, könnte man sich ja vorstellen.

Aber es entspricht halt nun mal nicht dem, was man wirklich vorliegen hat, wenn man das quantenmechanisch analysiert, wenn man genau hinterfragt, was das impliziert.

Zum Beispiel im Grundzustand vom Wasserstoffatom wissen wir in der Quantenmechanik, dass das Elektron keinen Drehimpuls hat.

Was das bedeutet ist, wenn ein Elektron im Kreis oder auf einer Ellipse um einen Kern, also sprich Planet fliegt um die Sonne herum, herumfliegt, ist der Drehimpuls immer immer immer von Null verschieden.

Im Wasserstoffatom im Grundzustand, das Elektron hat keinen Drehimpuls.

Es ist mehr eine Art Sausen durch den Kern.

Also so als ob das Elektron reingeht in den Kern und immer so, nicht so wie ein Kreis oder eine Ellipse, sondern mehr durch den Kern.

Und wenn man fragt, wo findet man das Elektron mit höchster Wahrscheinlichkeit, ist es am Ort des Kerns.

Das heißt, Sie haben im Wasserstoffatom eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, die als Funktion des Abstands vom Kern exponentiell abfällt.

Das heißt, die Wahrscheinlichkeit ist am höchsten am Ort des Kerns und dann geht die so runter.

Also wenn man, so muss ich sagen, wenn man einzelne Punkte im Raum miteinander vergleicht und all diesen Punkten im Raum ist der Punkt, wo der Kern sitzt, der, wo die Aufenthaltswahrscheinlichkeit am höchsten ist.

Ja, aber das geht doch gar nicht.

Also jetzt würde jetzt meine Alltagserfahrung, also der Mond kann ja nicht im

Erdkern.

Wie soll der das machen?

Da ist ja schon ein Erdkern.

Ja, genau.

Aber Sie müssen verstehen, dass wir hier Modelle angucken, wo wir den Teilchen Selbia keine Ausdehnung zuordnen.

Also Punkte aufeinander sitzen zu lassen, die können sie infinitissimal nahe aneinander bringen, das tut ja nicht weh.

Deshalb sagte ich, wenn man sich plötzlich Gedanken macht, hat denn das Proton eine Ausdehnung, dann merkt so ein Elektron, da es ja an verschiedenen Stellen sein kann, kann es diese Ausdehnung sehen.

Und das kann man im Experiment messen.

Und um es zu verstehen, was das für eine Herausforderung ist, das Atom hat einen Durchmesser von etwa einem Zehntel eines Milliardstel Meters.

Der Kern, das Proton, hat einen Durchmesser, das ist etwa 100.000 mal kleiner.

Also vom Standpunkt des Durchmessers des Atoms wirkt das Proton schon ziemlich wie ein Punkt.

Und trotzdem, heute kann man die Quantenenergie in so etwas wie einem Wasserstoffatom mit so hoher Präzision messen und Theodor Hensch vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching hat genau für Messungen dieser Art seinen Nobelpreis bekommen.

Die können mit einer Genauigkeit diese Quantenzustände messen, dass sie so

etwas wie Ausdehnung des Protons zum Beispiel da direkt drin sehen können.

Und insofern, worauf ich hinaus will, dass dieses Bild, wie eigentlich der Zustand von so einem Atom aussieht, gerade vom Wasserstoffatom im Grundzustand, passt überhaupt nicht zu unserer Vorstellung von einem Planeten, der auf einer Kreisbahn um den Kern herum fliegt.

Und das ist ein falsches Bild.

Das Elektron ist häufig am Ort des Kerns, dort.

Es gibt auch Zustände in der Quantenmechanik mit Drehimpuls größer null und unter bestimmten Bedingungen, gerade mit großen Drehimpulsen, kann man Zustände erzeugen, die Eigenschaften haben, die immer planetenartiger wirken.

Planet bezüglich Sonne.

Man kann Quantenzustände von Elektronen erzeugen, die Durchmesser haben von vielleicht nur einem Millionstel Meter, also vielleicht 10.000 mal größer als der normale atomare Durchmesser, wo also das Elektron relativ gesprochen auf großem Abstand sich bewegt.

Und man kann da richtig Zustände erzeugen, wo das Elektron fast wie ein klassisches Teilchen sich um den Kern herum bewegt.

Das kann man machen, aber die, ich sag mal, natürlichen Zustände, die Grundzustände, gerade von so etwas wie Wasserstoffatom oder Heliumatom, die sind anders.

Die sind nicht so planetenartig und werden von der klassischen Mechanik so auch dann nicht richtig beschrieben.

Und wie gesagt, deshalb ist es wahr, dass wir häufig Bilder haben, weil das war Ihre Ausgangsfrage, haben wir Bilder.

Ich glaube die meisten von uns haben da häufig irgendein Bild, aber wir lernen im Laufe der Zeit auch mitunter die Grenzen unserer Bilder zu erkennen und zu versuchen die auszublenden oder zumindest immer im Hinterkopf zu behalten, hm, es kann schief gehen, wenn wir unser Bild zu ernst nehmen.

Und je nach Typ, manche denken vielleicht sehr geometrisch, also ich bin zum Beispiel ein Typ, der sehr in Gleichung denkt.

Ich habe sehr häufig eine Gleichung im Kopf als wirklich eine physikalische Realisierung der Gleichung.

Das funktioniert bei mir gut, aber andere denken anders, andere denken sehr geometrisch, andere denken vielleicht in Zahlen, andere wirklich in, vielleicht auch in Worten, keine Ahnung, das ist eine Persönlichkeitsfrage.

Ich denke gerne in Gleichung.

Was ich mit der Newton'schen Mechanik mache, weiß ich.

Da gucke ich halt, wenn ich die Billardkugel anstoße, wo geht die denn hin?

Ja.

Was mache ich mit der Quantenmechanik?

Also mit der Quantenmechanik können Sie, also was ich sagen sollte ist folgendes.

Nach allem was wir verstehen ist die klassische Physik, Newton'sche Gleichung, das ist eine Näherung zur Quantenmechanik auf den Skalen, mit denen wir es so im Alltagsleben zu tun haben.

Gegen Türen rennen und so.

Gegen Türen rennen und Tennis spielen und den Ball hinher flitzen lassen oder so.

Die Newton'schen Mechanik funktioniert dafür ganz toll.

Das ist auch eine gute, während meine Sprache in "gute Näherung" zu den physikalisch korrekten Gleichungen, auch eine praktisch gute Näherung, weil man viel leichter damit rechnen kann.

Die Quantenmechanik spielt dann im Alltag, sag ich mal, eine Rolle, wenn wir verstehen wollen, wie die Eigenschaften von Materie aufgrund ihrer mikroskopischen Bausteine zustande kommt.

Also zum Beispiel warum hat denn ein bestimmtes Material die Farbe oder jene Farbe, warum hat denn ein bestimmtes Material die Leitfähigkeit oder vielleicht gar keine Leitfähigkeit.

Also es gibt Materialien, die leiten Strom nicht und es gibt Metalle, die leiten den Strom eher gut.

Und dann gibt es sogar Supraleite.

Die Quantenmechanik kann darüber aussagen, warum das so ist.

Die Quantenmechanik, also gerade die Festkörperphysik beschäftigt sich ja mit der Frage, warum Festkörper bestimmte Materialeigenschaften haben und versucht diese Eigenschaften aufgrund der quantenmechanischen Bewegungsgleichung, der quantenmechanischen Grundgleichung der Natur zu erklären.

Also in der Quantenmechanik kann man erklären, warum Kupfer ein Metall ist, zum Beispiel.

Oder warum Natriumchloridkristall, also ein Salzkristall, warum der so brüchig ist.

Oder man kann erklären, warum die Atome in einem Kristall einen gewissen Abstand haben.

Also ich sagte vorhin, man hat immer Abstände von etwa einem Zehntel, von einem Milliardstel Meter.

Das hat natürlich dramatische Konsequenzen, weil jedes Atom hat eine gewisse Masse und wenn die in einem bestimmten Abstand sind, dann führt das ja zu einer gewissen Massedichte.

Also wir könnten zum Beispiel deshalb vorhersagen, dass ein Liter Wasser ein Kilogramm wiegen wird.

Weil wir ja wissen, wie dicht das ist mikroskopisch.

Wir könnten es aber doch auch einfach wiegen.

Natürlich, natürlich können wir.

Dann sehen wir aber auch nur das, was ein Kilo wiegt und nicht warum.

Ganz genau.

Und häufig ist es ja so, man weiß nicht immer von vornherein, was für eine Eigenschaft ein Material hat.

Man möchte vielleicht auch neue Materialklassen schaffen.

Das heißt, man hat die Möglichkeit, entweder mische ich ganz, ganz viele verschiedene Substanzen wild zusammen und hoffe, irgendwann passiert mal was ganz Tolles.

Dann nennt man es Alchemie.

Dann nennt man es Alchemie.

Oder man versucht halt aufgrund dieses mikroskopischen Verständnisses, das irgendwie systematisch zu machen, um vielleicht, da muss man schauen, wie weit es geht, aber vielleicht an der einen oder anderen Stelle auch das Experiment mindestens zu ergänzen, vielleicht ab und zu auch zu ersetzen.

Also nicht ultimativ zu ersetzen, sondern im Sinne von eine ganze Reihe von möglichen Substanzen vielleicht aufgrund des mikroskopischen Verständnisses, ich sag mal, rechnen, Erwartungen formulieren aufgrund der Rechnung, was für Eigenschaften da auftreten sollten.

Und dann natürlich ultimativ, weil wir immer nur Quantenmechanik approximativ rechnen können, eine Messung machen, das Material wirklich synthetisieren, zu schauen, wie weit waren denn unsere Erwartungen korrekt.

Das kann also nie ganz entkoppelt sein.

Wir behaupten nie, dass man wirklich Quantenmechanik, außer vielleicht für die Zustände von Wasserstoffatomen, so präzise und universell verlässlich machen kann, dass man sich jemals vom Experiment loslösen kann.

Dieser Anspruch kann man nicht haben und das wäre auch keine Naturwissenschaft mehr.

Wir brauchen dieses Zwischenspiel, Theorie, Experiment.

Aber die Theorie kann das sehr viel leisten und was wir wirklich machen können, ist Eigenschaften von Materie.

Wenn zum Beispiel jemand sagt, ein Wassermolekül H_2O hat so eine Struktur, wo ein Sauerstoffatom, ich sag mal, das ist das schwerste Atom in dem Molekül und

von dem Sauerstoffatom weg, unter einem gewissen Winkel gehen, sind zwei Wasserstoffatome.

Also die drei Atome, so dass sie eine ganz spezifische Winkelstruktur haben, eine ganz spezifische Bindungslänge zwischen Sauerstoff- und Wasserstoffatom.

Diese Eigenschaften können wir quantenmechanisch komplett rechnen und im Experiment auch komplett verifizieren.

Und das können wir halt, wir wissen sozusagen, dass wir es können, wir wissen, dass die Quantenmechanik das auch korrekt beschreibt, wo wir irgendwann zusammenbrechen, ist wenn sie sagen, warum machen sie das jetzt nicht irgendwie für ein größeres Molekül?

Das Problem ist, wir müssen quasi den Zustand finden des Systems, wo die Energie des Gesamtmoleküls ihr Minimum annimmt.

Das nennen wir dann die Gleichgewichtsstruktur, Minimierung der Energie des Moleküls.

Und wenn sie ganz viele Atome haben, dann zum einen wird das quantenmechanische Problem, weil sie immer mehr Elektronen auch haben, immer unangenehmer, es wird immer schwieriger genau zu sein, aber die Möglichkeiten, viele Kerne in verschiedene Positionen zu setzen, die Anzahl der Möglichkeiten, die wird halt beliebig groß.

Und da kommen wir dann an unsere Grenzen.

Es ist aber nicht, dass wir an die Grenzen kommen, dass wir meinen Quantenmechanik bricht zusammen, es ist mehr so, wir kommen an die Grenzen des Praktikabils.

Das kann dann kein Computer mehr rechnen.

Das kann kein Computer mehr rechnen.

Viele Festkörper können wir deshalb ganz gut rechnen, auch gerade das elektronische Problem, weil wir den Festkörper, Festkörper heißt das häufig, Kristall.

Und Kristall impliziert, dass im gewissen Sinne, wenn sie von einem Atom zum nächsten und zum nächsten gehen, dass das sich etwas periodisch wiederholt.

Regelmaß, genau.

Und diese Regelmäßigkeit kann man nutzen, um das eigentliche Problem, ich sag mal, auf eine kleinere Einheit des Kristalls zu reduzieren und dort und damit...

Und dann anzunehmen, dass es auch in Zukunft so bleibt.

Und das sich wiederholt und dieses Wiederholens, das nutzen sie im gewissen Sinne aus.

Wenn aber jetzt das Objekt wahnsinnig irregulär ist und sie ganz, ganz viele Atome haben, die alle mögliche irregulär angeordnet sind, so wie in einem typischen biologischen Molekül, dann wird das ganz schwierig, das komplett durchzurechnen.

Da muss man also mit ganz verschiedenen Ahnungen reingehen.

Aber grundsätzlich sind wir in der Lage, sehr, sehr viel über die Grundeigenschaften der Materie, Struktur, Eigenschaften, Wärmeleitfähigkeit, elektrische Leitfähigkeit und so weiter, aufgrund der Quantenmechanik wirklich zu erklären.

Ich sagte gerade Computer, es gibt ja so diesen Quantencomputer, der immer mal wieder durch die Medien geistert.

Können Sie erklären, wie das funktionieren soll und ob es funktioniert?

Okay, also der Quantencomputer lebt davon, von der Idee, dass anders als beim klassischen Computer es nicht einfach nur Bits gibt, sondern sogenannte Qubits.

Und bei einem Bit, das Bit nimmt den Wert an, entweder 0 oder 1, das sind zwei Werte oder Sie können auch sagen unten oder oben, aber es sind zwei eindeutige Werte.

Ein Bit ist entweder unten oder ein Bit ist oben.

Es ist nicht irgendwas.

Es ist unten und es ist oben.

Und Quantenbits werden dann interessant, wenn man ein paar Bits hat.

Und daher kommt etwas rein, was wiederum etwas ist, was Quantenmechanik so ungewöhnlich macht.

Und das ist der Begriff der sogenannten Verschränkung.

Und zwar, die Verschränkung ist eine Sache, die man wirklich klassisch so nicht nachvollziehen kann.

Und zwar, wenn Sie zwei Bits haben, dann gibt es in der Quantenmechanik eine Möglichkeit, einen Zustand zu haben, einen maximal verschränkten Zustand.

Das ist ein Quantenzustand der beiden Bits, ein Quantenzustand, der alle Informationen beinhaltet, die man über diese zwei Bits haben kann.

Aber wenn Sie dann fragen, was wissen Sie denn über das eine bzw. über das andere Bit, dann wird die Quantenmechanik sagen, absolut gar nichts.

In diesem Zustand, wo der Gesamtzustand vollständig charakterisiert ist, können Sie nicht sagen, ob das linke Bit oben oder unten zeigt oder in der Null oder Eins ist oder ob das rechte in der Null oder Eins zeigt.

Das ist unmöglich zu sagen.

Klassisch gibt es das nicht.

Klassisch gibt es nicht, dass Sie über das Gesamtsystem alles wissen, was Sie wissen können und über die Subteile gar nichts wissen.

Klassisch wissen Sie über die Subteile genauso viel wie über das Gesamtsystem.

Und diese Subtilität führt zu neuen Möglichkeiten in Rechenschritten, also Dinge mit Quantenprozessen zu rechnen, mit den logischen Schritten, die in Quantenbits, gerade verschränkte Quantenbits eröffnen, ermöglichen Ihnen die Möglichkeit Rechenprozesse durchzuführen, Komplexität zu lösen, die Sie mit klassischen Bits so nicht ohne weiteres lösen können.

Das ist so ein bisschen die Idee.

Ich bin selber nicht aus dem Gebet, aber es beruht auf der Idee, dass es in der Quantenwelt das Konzept der Verschränkung gibt und die Möglichkeit, dass Gesamtzustände zwar vollständig bekannt sein können und Nullwissen über die individuellen Subsysteme vorliegen kann, ein Phänomen, das es halt klassisch nicht gibt.

Woraus würde man denn sowas bauen?

Also woraus baut man denn Quantenbits?

Leiterbahnen können es ja nicht mehr sein, oder?

Ja, und die Objekte, die quasi die Logik machen, müssen halt Objekte sein, die

der Quantenmechanik genügen.

Und das können beispielsweise einzelne atomare Ionen sein.

Also das ist etwas, was man schon seit vielen Jahren verfolgt.

Da gibt es sogenannte Ionenfallen.

Da hat man also einzelne geladene Atome und die hat man dann zum Beispiel entlang so einer länglichen Falle aufgereiht.

Also quasi wie einzelne Atome, die nebeneinander sitzen, einen gewissen Abstand voneinander haben und die Atome können sich gegenseitig sehen, dadurch dass die haben ja eine Ladung, dadurch stoßen die sich gegenseitig ab.

Dann kann man, im Englischen gibt es Newton's Cradle, also dieses Spielchen, wo diese Kugeln, die gegeneinander stoßen und sowas ähnliches kann man dann mit diesen Quantenobjekten machen.

Und dann kann man quasi die internen Zustände, jede dieser Ionen hat typischerweise einen intrinsischen Drehimpuls, das nennt man einen Spin.

Und wenn zum Beispiel so ein Ion einen Spin einhalb hat, dann ist das ein perfektes Qubit mit genau zwei Zuständen.

Spin kann nach oben gucken oder Spin kann nach unten gucken.

Dann wäre jedes dieser Ionen eine Realisierung eines solchen Quantenbits.

Das hängt mit etwas zusammen, was man in der Vergangenheit auch als Raumquantisierung bezeichnet hat.

Nicht nur Energie unterliegt einer Quantisierung, sondern Drehimpuls unterliegt einer Quantisierung und dadurch, wenn sich im gewissen Sinn etwas dreht, kann

die Achse, um die es sich dreht, nicht unbedingt beliebige Werte annehmen.

Und zum Beispiel im Fall von so einem Spin-einhalb-Teilchen, ein Elektron zum Beispiel ist auch ein Spin-einhalb-Teilchen, Sie können sich vorstellen, das nur mit Elektronen zu machen, wenn Sie wüssten, wie Sie die abfragen.

Die haben genau diese Eigenschaft, eine Null und eine Eins oder ein Spin-down oder Spin-up.

Das sind genau solche zwei Quantenzustände und wenn Sie dann zwei solche Spin-einhalb-Teilchen haben, können Sie die miteinander verschränken und die Verschränkung erfolgt typischerweise dadurch, dass Sie den beiden auch die Möglichkeit geben, miteinander zu wechselwirken.

Und Wechselwirkungen helfen normalerweise dazu, Verschränkungen aufzubauen zwischen Quantenobjekten.

Aber wenn ich denen auch nur eine Eins und eine Null zuweisen kann oder die nur Eins oder Null sein können, habe ich doch überhaupt keinen Vorteil?

Ja, also das ist richtig, weil ich habe eine Sache nicht gesagt.

Es ist richtig, dass ein klassisches Bit kann nur eine Null oder Eins haben, aber ein Quantum Bit lebt ja im Quantenzustandsraum des Bits.

Und der Quantenzustandsraum, das ist wieder ein Punkt, den ich vorher nicht so ausgeführt habe.

Was heißt eigentlich Zustand in der Quantenmechanik?

Zustand in der Quantenmechanik erfordert, dass man ein Element eines sogenannten Hilbertraums angebt.

Das heißt, zu einem Elektron gibt es, wenn wir nur den Spin des Elektrons

betrachten, dann ist das ein sogenannter Hilbertraum, ein zweidimensionaler komplexer Hilbertraum.

Und ein allgemeiner Zustand, das sind erstmal nur Worte und erstmal kann ich das auch nicht ändern.

Zur Erläuterung, mein Gesicht macht komische Sachen, weil ich Dinge nicht verstehe.

Absolut, aber lassen Sie mich versuchen zu sagen, weil was passiert, es hat ein bisschen was zu tun mit einer Verallgemeinerung der linearen Algebra.

In der linearen Algebra, da geht es ja, in der Schule lernt man sowas wie Vektoren, da zeigt man einen Pfeil vom Ursprung an irgendeinem Punkt im Raum.

Das war übrigens das zweite Fach, deswegen ich sitzen geblieben bin.

Das eine war Chemie und das andere Mathematik.

Lineare Algebra, ja.

Aber vielleicht erinnern Sie sich.

Ich erinnere mich dran, ja.

So jedenfalls grob.

Aber in der Idee, dass man vielleicht einen Pfeil hatte und einen zweiten Pfeil hatte und dann konnte man die Pfeile zusammen addieren und hat man einen neuen Pfeil bekommen.

Und diese Idee, dass man das Konzept von Pfeilen, die man als einzelne Vektoren bezeichnet, die haben ja die Eigenschaft, dass man die Pfeile miteinander addieren kann, man kann die voneinander subtrahieren, man kann jeden Pfeil mit

einer Zahl multiplizieren und dadurch strecken oder kontrahieren.

Wenn man sowas hat, eine Menge von Objekten, die diese Eigenschaften erfüllen, man kann addieren, man hat eine Null, man hat zum Beispiel einen Vektor, Länge Null, den kann man überall dazu addieren, es passiert nichts.

Wenn man solche Dinge hat, oh, dazu kann ich zu jedem Vektor sein Negatives hinzu addieren, dann kriege ich halt die Null zurück.

Also ich gehe einmal in die Richtung, dann gehe ich einmal zurück und dann bin ich wieder im Ursprung.

Wenn man solche Eigenschaften hat, das kann man verallgemeinern über diese anschaulichen Pfeile hinaus, dann hat man etwas, das nennt man einen Vektorraum.

Und in der klassischen Mechanik braucht es konzeptionell nicht das Konzept eines Vektorraums, um den Zustand eines klassischen Systems anzugeben.

Man muss nur angeben, wie gesagt, wo sitzt das Teilchen, wie schnell bewegt sich das.

Das ist also nicht eine Annahme, dass man eine Art Struktur braucht, wo es wichtig ist, einen Zustand zu einem anderen hinzu addieren zu können oder von einem anderen abziehen zu können oder den Zustand zu strecken oder so.

Das gibt es nicht in der klassischen Mechanik.

Aber der Raum der Zustände in der Quantenmechanik ist so ein Vektorraum.

Und zwar nicht ein anschaulicher Vektorraum, es ist ein abstrakter Vektorraum, aber es hat die lustige Konsequenz, dass man einen Zustand nehmen kann, nennen wir denn jetzt mal den Zustand 0.

Und zwar meine ich jetzt den Zustand Bit 0.

Und man kann den Zustand nehmen Bit 1 und man kann die miteinander überlagern.

Zum Beispiel 50 Prozent, jetzt kontrahiere ich ein bisschen meinen Pfeil, den ich vielleicht um Faktor 2 kontrahiere, nehme vielleicht einen anderen Pfeil, kontrahiere den um Faktor 2 und dann addiere ich zusammen und kriege einen neuen Pfeil.

Dann kriege ich in der Quantenmechanik einen neuen Zustand und das ist ein physikalisch erlaubter Zustand.

Das ist was das Quantum Bit ausmacht.

Es gibt die Möglichkeit, dass Sie solche Quantenmechanischen Superpositionen, wie man das auch nennt, bekommen können, nämlich eine Überlagerung von so und so viel Zustand 0, Bit 0, Bit Wert 0 und so und so viel mal Bit Wert 1.

Im Sinne einer Überlagerung der Quantenzustände, im Sinne einer Überlagerung von zwei Vektoren, wo man jedem Vektor ein entsprechendes Gewicht gibt und die Ergebnisse zusammen addiert.

Und das ist auch der Punkt, wenn man so einen total verschränkten Zustand hat.

Wenn ich sagen kann, die zwei Qubits, ich weiß zwar wie der Gesamtzustand quantenmechanisch aussieht, aber ich weiß nicht, ob das Bit links entweder im Zustand 0 oder im Zustand 1 ist, da gehen genau solche Superpositionen ein.

Aber es gehen Superpositionen ein von diesen beiden Bit-Zuständen.

Also Quantenmechanik lebt davon, dass man in einem Art abstrakten Vektorraum arbeitet.

Dadurch wird das auch so schwierig, es zu vermitteln.

Weil die ganze Logik ist diese Vektorraum-Logik.

Und wenn man Vektorräume nur von Pfeilen her kennt, wird es relativ schwierig, das zu verstehen.

Aber vielleicht hilft dieses anschauliche Bild, dass man Pfeile addieren kann und genauso können wir Quantenzustände addieren.

Superpositionen bilden, das kann man klassisch nicht.

Und deshalb gibt es Qubits durch die Superpositionsbildung und klassisch aber nicht.

Ein Bit in der klassischen Physik ist eine 0 oder eine 1.

Und es gibt nicht eine Superposition, es gibt nicht diese Vektorraumstruktur in der klassischen Mechanik.

Für die Zustände gibt es keine Vektorraumstruktur.

Jetzt gibt es in so bestimmten Bereichen der irrationalen Überzeugungssysteme, also bei den Esoterikern, das Argument, dass deren Fernheilungskonzepte oder was auch immer, die sich gerade so ausdenken, dass das durch Quantenmechanik beschreibbar wäre.

Kann das sein, dass was sie machen, dass die Quantenmechanik tatsächlich unmittelbare Wirkung auf unsere grobstoffliche newtonsche Welt hat?

Ja, also gut, ich glaube, dazu kann ich direkt nichts sagen zur Esoterik, aber die Quantenmechanik hat nachweisbar, die makroskopische Welt, wie wir sie sehen, also zum Beispiel, wenn sie etwas sehen, wenn sie mich jetzt sehen, dann passiert ja in ihrem Auge etwas.

Da passiert ein quantenmechanischer Prozess.

Ein Lichtteilchen, das in ihr Auge trifft, induziert dort in einem Molekül in ihrem Auge einen Prozess, wo ein Molekül eine strukturelle Änderung durchläuft, nachdem ein Quantenübergang induziert wurde.

Ein Quantenübergang, in dem ein Lichtteilchen absorbiert wurde, ein Quantensprung gemacht wurde vom einen zum anderen Zustand, in dem neuen Zustand macht das Molekül eine strukturelle Änderung und diese strukturelle Änderung ist der Startpunkt eines Nervenpulses, der dann im Hirn verarbeitet wird.

Also alle möglichen Dinge, wo wir sofort sagen würden, klar, das ist unsere alltägliche Erfahrung, wenn wir darüber nachdenken, warum es das tut, können wir quantenmechanisch verstehen.

Hat mikroskopische Ursache.

Wie weit wir jetzt sagen können, der mikroskopische Prozess hat makroskopische Konsequenzen, also sehen ist etwas, was in unserem Hirn passiert und da ist ja irgendwo auch ein mikroskopischer Prozess, zumindest auf dem Level von Zellen, der sich niederschlägt.

Wie weit wir jetzt sagen können, ein Objekt, das wir makroskopisch haben, hat sozusagen offensichtlich Quanteneigenschaften.

Das ist nicht immer einfach zu beantworten, aber Physiker haben Fälle produziert, wo wir makroskopische Materie vorliegen haben, die komplett in ihren Eigenschaften quantenmechanisch ist.

Und zwar in ihren offenbar sichtbaren makroskopischen Eigenschaften.

Was hat man da gesehen?

Ja, also eines der bekanntesten Beispiele, vielleicht das beste Beispiel ist etwas, das nennt man superflüssiges Helium.

Und was das ist, Helium, ab einer gewissen Temperatur kann man flüssig kriegen und wenn man unterhalb einer charakteristischen Temperatur in dieser Flüssigkeit ist, dann kann man die Viskosität dieser Flüssigkeit eliminieren.

Was bedeutet das?

Normale Flüssigkeiten, wenn sie da drin rühren, dann rühren sie ein bisschen, dann bildet sich ein Wirbel aus, dann ziehen sie ihr Rührgerät wieder raus und dann verschwindet der Wirbel auch.

In einer Superflüssigkeit können sie Wirbel bilden, die bleiben einfach erhalten.

Die haben keine innere Reibung, wenn sie so wollen, weil Viskosität ist ja eine Form von innerer Reibung in der Flüssigkeit.

Also ich hab eine Flüssigkeit, die stoße ich einmal an, die schwappt dann bis zum St.

Nimmerleins Tal.

Und das ist die Superflüssigkeit und das ist diese Eigenschaften von der Superflüssigkeit wie dem superflüssigen Helium, das ist ein Stück makroskopische Quantenmaterie.

Oder wenn die Leute heutzutage in kalten atomaren Gasen sogenannte Bose-Einstein-Kondensate bilden, dafür gab es ja auch vor einigen Jahren den Nobelpreis und auch hier in Hamburg sind Leute sehr aktiv in dem Bereich der kalten Quantengase.

Da kann man wirklich in diese Fallen, in denen die die Quantengase einfangen,

reingucken und dann sieht man da leuchtende Wolken, die wirklich makroskopisch groß sind.

Die sehen sie mit ihren Augen und das sind Objekte, die Quanteneigenschaften haben und zwar makroskopische Effekte mit demonstrierbaren Quanteneigenschaften.

Das sind aber immer so Dinge, da hat jemand viel viele Experimente gemacht, das sind typischerweise Experimente.

Dass ich jetzt Kraft meines Willens ihr Wasserglas über den Tisch wandern lasse, wäre das überhaupt ein Quanteneffekt?

Das ist nicht zwingend, nicht wahr?

Man könnte sich vorstellen, wenn klassische Teilchen, also in der Physik, in unserer Welt der Physik gibt es für jeden Effekt, den wir sehen, ja auch immer irgendwie, ich sag, eine Kraft, die die Bewegung ändert, die das Verhalten des Systems ändert.

Das heißt ich müsste in der Lage sein Teilchen auszusenden, die mit diesem Wasserglas kommunizieren.

Genau und den Effekt hervorrufen und das kann man erstmal nicht unbedingt ausschließen, also zum Beispiel ganz hypothetisch gesagt, durch aktive Hirntätigkeit, Hirntätigkeit heißt ja, da gibt es Nervenimpulse, Nervenimpulse werden getragen dadurch, dass Ionen durch irgendwelche Ionenkanäle durchgehen und da verschiedene Membranpotenziale sich ändern und Pipapo.

Aber wenn geladene Teilchen sich bewegen, dann entsteht ja elektromagnetische Wellen.

Das ist ja wie eine Antenne funktioniert.

Das heißt wenn ich mich hinreichend konzentriere, würde mein Gehirn elektromagnetartig... ..dass man elektromagnetische Wellen potenziell abstrahlen können, die Wahrscheinlichkeit, dass sie da viel Leistung abstrahlen, ist wahrscheinlich nicht sehr groß und die Frage, ob ich oder dieses Wasserglas diese Leistung wahrnehmen kann, das ist eine legitime Frage.

Ich meine, dass man sowas messen kann, das sieht man ja auch mit Elektroenzephalogramm, also EEGs und so weiter.

Also natürlich diese elektrischen Tätigkeiten im Hirn kann man auch außerhalb des Kopfs quasi nachweisen.

Wenn man es direkt durch eine Elektrode nachweisen kann, wird da auch abgestrahlt.

Wie groß die abgestrahlte Leistung ist, kann man ganz bestimmt quantifizieren.

Ich habe mich nicht damit beschäftigt, aber ich glaube da kommt nicht viel an, wenn Sie sich jetzt angestrengt überlegen, wie kriege ich jetzt einen Herrn Sandra zum Braten.

Vermutlich passiert da nicht so viel.

Aber konzeptionell ist es natürlich so, in der Physik gibt es keine Fernwechselwirkung, ohne dass da etwas sozusagen von A nach B geht.

Und A nach B gehen heißt, es ist nach allem was wir wissen, auch in der Geschwindigkeit der Kommunikation beschränkt durch die Lichtgeschwindigkeit.

Das heißt, wenn Sie jetzt sagen, ich will jetzt das Herrn Sandra frieren, dann wird es zumindest so lange dauern, wie Licht braucht, um von Ihnen zu mir zu kommen.

Das ist für uns im Alltag natürlich instantan, weil Licht sich ziemlich schnell

bewegt.

Aber wir würden immer noch in der Physik zumindest sagen, eine ganze Reihe von Prinzipien, die wir aufgrund von vielen, vielen Experimenten und Hinterfragen und Verbesserungen unserer mathematischen Beschreibung der Natur und wiederum Testen dieser Beschreibung erarbeitet haben, instantane Fernwechselwirkung gibt es nicht.

Und wenn es einen Effekt gibt, dann muss es auch physikalisch auf Dinge unterkochbar sein, die man durch die uns bekannten Wechselwirkungen beschreiben kann.

Wenn ich natürlich zur Zeit die uns bekannten Wechselwirkungen meine, ich meine auch die Wechselwirkungen, von denen wir im Alltag wissen, dass sie einen Effekt haben.

Das sind im Wesentlichen elektromagnetische Strahlung und die Coulomb-Wechselwirkung.

Wenn dann jemand sagt, ja, aber was ist mit der dunklen Materie?

Niemand weiß, was dunkle Materie ist.

Vielleicht kann ich Leute beeinflussen, indem ich ganz viel dunkle Materie abstrahle.

Das würde ich dann persönlich zum gegenwärtigen Zeitpunkt als Quacksalberei bezeichnen.

Klingt auch so, ja.

Ja, ich sag nur, weil vielleicht würde jemand argumentieren, niemand weiß, was dunkle Materie ist.

Darum heißt sie ja dunkel.

Ja, das ist nicht der Grund.

Also es heißt nicht dunkle Materie, weil wir nicht wissen, was es ist.

Aber es gibt immer in der seriösen Wissenschaft einen Punkt, wo wir auch sagen müssen, im Moment ist das immer noch Forschungsgegenstand.

Und wenn es ein Forschungsgegenstand ist, haben wir noch keine ultimative Antwort zu etwas haben, kann man natürlich sagen, ja, aber könnte es nicht das sein?

Aber meistens ist unser Verständnis zu dem Zeitpunkt, wo diese Frage aufkommt, weit genug, um diese Dinge auszudrücken.

Nein, könnte es nicht.

Ja, glaube ich kann man so sagen.

Es gab doch, ich krieg's nicht mehr genau zusammen, es gab doch mal so ein Experiment, wo sich Verschränkungen sagten, wo irgendwie zwei Teilchen, die ganz weit voneinander entfernt waren, irgendwie miteinander verbunden waren.

Was erinnern Sie sich?

Also dieses Thema Verschränkung führt zu etwas, was Einstein mit zwei Kollegen, Einstein, Podolsky und Rosen untersucht hatten und das ist, sagt man deshalb auch kurz, EPR-Experiment, wo man im Wesentlichen so ein verschränktes Paar von zum Beispiel zwei Elektronen oder... Wie verschränkt man die überhaupt?

Oder ist das auch wieder so eine Frage, die... Also, okay.

Wie mach ich, also ja, wie knuppere ich die zusammen?

Ja, Verschränkung heißt ja, Sie müssen eine solche Quantensuperposition von zwei Qubitvektoren, also stellen Sie sich vor, Sie haben zwei Qubits und jeder dieser zwei Qubits hat in diesem Vektorraum von zwei Qubits einen Quantenzustand, da müssen Sie eine Überlagerung von zwei Zuständen hinkriegen.

Und einen Weg, wie man ein Qubit erzeugen kann, das ist sicher nicht das einzige, aber man kann ganz natürliche Prozesse heranziehen, zum Beispiel, wenn Sie mal ein beliebtes Wasserstoffatom nehmen und das Wasserstoffatom in den mehr oder weniger ersten angeregten Zustand bringen.

Das ist ein angeregter Zustand vom Wasserstoffatom, wo das Elektron wiederum keinen Drehimpuls hat.

Ein $L=0$ Zustand, wie wir in der Quantenmechanik sagen.

Und dieser erste angeregte Zustand vom Wasserstoffatom zerfällt, also gibt seine Anregungsenergie ab, indem er zwei Photon rausspuckt.

Und die zwei Photon sind miteinander verschränkt.

Aufgrund des Prozesses, wie die quasi zusammengeboren werden in diesem Abregungsprozess von dem Wasserstoffatom.

Man muss da gar nicht viel tun.

Und man kann dann einfach, ein Photon fliegt nach links, ein anderes Photon fliegt nach rechts und dann können Sie die beiden detektieren und können die Eigenschaften der beiden untersuchen.

Und bei dem EPR Experiment, was die Leute da immer irgendwie dran gestört hat, ist, also beim EPR Experiment können Sie sich vorstellen, also das Atom oder

der, der das Atom präpariert und das Atom anregt, der weiß, er hat ja das Atom in einen wohldefinierten Quantenzustand gebracht.

Weil das ist jetzt bei mir im Labor und ich sitze da und habe das in dem Zustand, ich habe Experimente gemacht, um sicherzustellen, das ist jetzt in diesem angeregten Zustand, das heißt alles Wissen, was ich haben kann, quantenmechanisch, um das System, habe ich mir erworben.

Und das bedeutet aber, quantenmechanisch, ich habe alles Wissen, um jetzt das Ganze in die Schrödinger Gleichung, die Zeit der P.K.

Schrödinger Gleichung, die mir sagt, wie sich dieses Quantensystem zeitlich entwickelt, um das lösen zu können.

Und dann kriege ich unter bestimmten Bedingungen für die Wellenfunktion von diesen zwei Photonen einen Zustand, der ist ein so verschränkter Zustand.

Dieser Zustand ist ein Zustand, wo ich quantenmechanisch alles weiß, was ich wissen kann über diesen zwei Photonen Zustand.

Ich weiß aber trotzdem eventuell nicht genau, ob das Photon links polarisiert ist oder rechts polarisiert ist und beim anderen auch nicht.

Aber in dem Moment, wenn ich es beim einen gemessen habe, weiß ich sofort, was das andere ist.

Und wenn ich meinen Detektor einen Kilometer nach da hinten setze oder von mir aus sogar einen Planeten weiter und den Detektor für das andere Photon, fünf Planeten in die andere Richtung setze, ich wüsste instantan, aufgrund meiner Detektion an dem Ort, wenn ich sozusagen links messe, wüsste ich beim anderen ist es rechts.

Und dann hat man abends so argumentiert, das heißt irgendwie, da ist Information geflossen.

Aber das ist ja nicht der Fall in diesem System.

Ich weiß nur, wie das andere ist, weil ich weiß, wie das eine ist.

Ja, weil ich praktisch annehme, dass ich schon weiß, wie das Ganze präpariert wurde.

Ich weiß eigentlich, dass es immer diese Korrelation gibt, wenn ich das eine messe und dann hat der andere das andere.

Das heißt, es ist nicht, weil was so im Volksmund ankommt, ist halt, wir sind da verschränkt und der kann dann, wenn der an dem einen dreht, dann dreht das andere sich auch.

Das ist gar nicht der Fall, sondern sie gucken nur, wie sieht es aus, ach so sieht es aus und können daraus ableiten, dass das andere so aussieht.

Das ist genau der Fall.

Sie können eben nicht irgendwelche Manipulationen machen an dem einen, die dann zu instantanen Änderungen am anderen führen.

Das gibt es nicht.

Aber der Zustand, was glaube ich das einzig wirklich Interessante an dem Problem ist eben, also konzeptionell, dass man nicht wissen kann, ob es links oder rechts ist beim einen oder links oder rechts ist beim anderen.

Also volles Unwissen über die Einzelmessung, obwohl wir wissen, der Quantenzustand des Gesamten ist vollständig definiert.

Und dieses komische Zwischenspiel von Nichtwissen über Untereinheiten und volles Wissen über das Gesamte, das ist eine der wirklich komischen

Eigenschaften der Quantenmechanik, dieses klassische Zürich.

Kann man daraus irgendwas Praktisches machen, aus diesem Umstand, dass wir...

Also ich würde sagen, die ganzen Versuche, Quantum Computing zu realisieren, sich neue Algorithmen zu überlegen, mit denen man neue Rechenaufgaben quasi oder Quantenlogikprozesse machen kann und aus logischen Schritten können Sie ja dann einen ganzen Algorithmus aufbauen, um Rechenaufgaben quasi zu bearbeiten.

Die beruhen auf solchen Ideen und der Möglichkeit der Verschränkung, die beruhen aber dann natürlich nicht jetzt speziell auf diesem Verschränkenpart, das ich gerade gesagt habe, wo Sie zwei Photon erzeugen in dem Relaxationsprozess von einem Wasserstoffatom.

Das wäre nicht praktisch.

Also das ist wenigstens noch was, was ich kapiere, also halt.

Aber damit kann man sich die Idee ganz gut vorstellen.

Da passiert es in einem gewissen Sinn natürlich.

Ja, aber die mehr so Quantum Computers, die die Leute bauen wollen, beruhen entweder auf so die Idee des Ionen, die man eine Falle hat.

Es gibt aber auch Versuche, wo man das Ganze wirklich im Festkörper realisiert.

Aber wie das im Detail funktioniert, das weiß ich auch nicht.

Also mit welchen Festkörpern die das realisieren, das weiß ich auch nicht.

Kann man davon auszugehen, dass das irgendwann mal sinnvoll funktioniert?

Also auch vielleicht in der Alltagsanwendung?

Oder ist das wirklich eher was für so Theoretiker ist wie Sie?

Ich glaube, da bin ich zu weit weg, um es mit Sicherheit zu sagen.

Ich habe den Eindruck, es gibt viel Fortschritte.

Die Literatur über die Jahre in diesem Bereich ist gewachsen.

Aber das ist jetzt trotz großer Bemühungen und auch sehr sehr viel Geld, das in den Bereich geflossen ist, dass man jetzt sagen kann, ein Quantencomputer für zu Hause ist praktisch nur eine Frage von wenigen Jahren.

Ich glaube, man kann da sagen, das ist nicht der Fall.

Das sind wir noch nicht.

Sie sagten eben Wellenfunktion.

Was ist das denn jetzt schon wieder?

Die Wellenfunktion.

Ja, also die Wellenfunktion ist ein Maß für diesen Vektor, für diesen Pfeil, der einen Quantenzustand darstellt.

Ich hatte vorhin eben gesagt, der Zustandsraum der Quantenmechanik für ein Quantenmechanisches System ist ein sehr sehr sehr abstrakter, komplexer Vektorraum, der ganz spezifische mathematische Eigenschaften hat und diese Eigenschaften machen den zu einem Hilbertraum.

Und deshalb, wenn Leute von Quantenmechanik reden, dann reden sie immer

ganz stolz, wir haben gelernt, was ein Hilbertraum ist.

Und dann freuen die sich und dann wissen sie, so ein Quantenzustand ist einer dieser Pfeile in diesem abstrakten Vektorraum.

Und für diese abstrakten Vektorräume, man kann, in Vektorräumen gibt es immer die Möglichkeit, wie man sagt, unterschiedliche Darstellungen zu wählen.

Also man kann sich ein Pfeil angucken bezüglich eines Achsensystems und sagen, das ist die Komponente von dem Pfeil bezüglich dieser Achse und der Achse und jener Achse.

Oder ich kann andere Achsen wählen, indem ich die Achsen im Raum drehe und dann kann ich vom gleichen Pfeil die Komponenten bezüglich dieser, dieser und dieser Achse angeben.

Dementsprechend, wie ich mir den Vektor angebe, der Zustand ist immer der gleiche, aber wie ich ihn angebe, hängt davon ab, was ich für eine Darstellung wähle.

Also bezüglich welcher Achsen ich in dem Raum meine Darstellung wähle.

Und wenn wir von der Wellenfunktion sprechen, dann wählen wir für den Quantenzustand eine Darstellung, die wir als Ortsdarstellung bezeichnen.

Und die Ortsdarstellung hat den Vorteil, dass wir sagen können, wenn wir dieses Objekt, die Wellenfunktion, quadrieren, dass sie uns sagt, mit welcher Wahrscheinlichkeit finden wir ein Teilchen hier und ein Teilchen hier und ein Teilchen hier.

Wenn es eine Dreielektronenwellenfunktion zum Beispiel wäre, dann würden wir die Wahrscheinlichkeit kriegen, dass ein Elektron am Punkt A sitzt, ein Elektron am Punkt B und ein Elektron am Punkt C.

Das ist das, was uns die Wellenfunktion gibt, wenn wir sie quadrieren.

Sie gibt uns die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Teilchen an, als Funktion des Orts, an dem wir fragen.

Ich will wissen, an diesem spezifischen Punkt und an diesem spezifischen Punkt und an diesem spezifischen Punkt.

Wenn ich es an anderen Punkten will, dann gebe ich halt diese anderen Punkte in die Wellenfunktion rein und spuck die mir, wenn ich es quadriere, raus, mit welcher Wahrscheinlichkeit ich die drei Teilchen an diesen anderen Punkten kriege.

Das ist, was die Wellenfunktion bedeutet.

Sind das eigentlich Sachen, die Sie am normalen PC hier auf Ihrem Schreibtisch rechnen können oder müssen Sie da einen Großrechner?

Am PC selber glaube ich rechnen meine Gruppe praktisch gar niemand was.

Wir haben einen Cluster von Rechnern, die wirklich Tag und Nacht nichts anderes machen als quantenmechanische und zum Teil auch klassische Rechnungen durchzuführen.

Und das heißt, man braucht Rechner, die dediziert gebaut sind, um Hochleistungsrechnungen durchführen zu können.

Das bedeutet nicht immer, dass man es im Supercomputer muss.

Wir können viele Sachen machen, aber das Problem ist, die quantenmechanischen Rechnungen, je nachdem wie genau man es sein will, die explodieren in ihrem Aufwand so schnell mit der Systemgröße, weil man eben Wellenfunktionen berechnen muss und nicht nur angeben, wo sitzt jedes Teilchen zu jedem Zeitpunkt wie eine klassische Mechanik, so dass Sie selbst,

wenn Sie von einem Rechnercluster wie uns haben zum Superrechner gehen, ist nicht klar, dass Sie gleich ein viel komplexeres System rechnen können.

Weil der Gewinn an Rechenkapazität ist nicht unbedingt diese vielen, vielen Größenordnungen größer, die Sie brauchen, um was rechnen zu können.

Deshalb, die Herausforderung der Quantenmechanik ist zum großen Teil ein praktisches, weil wir so schnell in eine Wand reinrennen aufgrund der konzeptionellen Anforderungen der Quantenmechanik.

Das, was sie eigentlich von uns will, was wir lösen sollen, so was wie die Wellenfunktionen bestimmen.

Und deshalb versuchen seit vielen Jahren Leute mit allen möglichen Tricks das irgendwie runter zu kochen.

Es gibt dafür das elektronische, viel Elektronenproblem, eine Methode, die sich Dichte-Funktional-Theorie nennt.

Und das ist eine Idee, um dieses Problem runter zu kochen, um es praktikabler werden zu lassen.

Aber das ist in seinen Grundzügen eher eine Art Existenzbeweis.

So nach dem Motto, ich weiß, ich könnte es im Prinzip, aber ich weiß nicht wirklich, wie.

Da gibt es dann auch in dem Gebiet nur Nahrung.

In Wirklichkeit, letzten Endes können wir alle nur grobe Nahrung machen und hoffen, dass unsere Nahrung nicht alle für Herren schlecht sind.

Um dadurch irgendwie die Rechnung in den Griff zu kriegen.

Aber grundsätzlich, wenn wir es ernst nehmen, die grundlegenden Gleichungen explodieren eigentlich direkt vor unserer Nase.

So komplex werden die, wenn wir das als mathematisches Problem allzu ernst nehmen.

Sie kommen also nie zum Ende?

Also Sie werden nie eine Gleichung haben, von der Sie sagen, das ist sie jetzt.

Rechnet damit.

Es hängt ein bisschen davon ab, was heißt Gleichung haben.

Ja schon, stimmt schon.

Solange es nur Variablen drin stehen, geht es ja noch.

Wenn die dann mal gefüllt werden, wird es schwierig.

Also ich glaube, es gibt in der Physik zwei verschiedene Strömungen.

Es gibt die eine Strömung, damit bewegen wir uns mehr, wo wir aussagen würden, dass die Grundgleichungen bekannt sind.

Wir wissen, dass die Grundteilchen, die unsere Alltagsmaterie ausmachen, nur drei Typen sind.

Eines sind die Elektronen, das andere sind die Kerne und das andere sind Lichtteilchen.

Mehr müssen wir eigentlich nicht wissen und die Theorie, die das beschreibt, das ist die Quantenelektrodynamik und zum ganz großen Teil können wir eben mit nicht-relativistischer Quantenelektrodynamik weit kommen.

Das ist sozusagen nur ein ganz kleines Teil des sogenannten Standardmodells der Teilchenphysik.

Und was uns da interessiert, ist also nicht, dass wir hinterfragen, könnten die Gleichungen anders aussehen, sondern, wenn sie denn diese paar wenigen Bausteine, ich meine die Anzahl der Elemente, die verschiedenen Kerne, die wir da antreffen, ist auch überschaubar groß.

Ich meine, es sind nicht mal wirklich 100, weil Element Uran, so sind das alles ohnehin radioaktive Elemente und die sind auch jetzt so vielleicht nicht alltäglich unsere materieb bestimmten Elemente.

Aber sagen wir mal so Pi mal Daumen, 100 verschiedene Kerne, was müssen wir von denen wissen?

Naja, was die für Ladung haben, das ist leicht, sehen Sie die Anzahl der Protonen und wir müssen vielleicht noch die Masse wissen.

Fertig.

Aufgrund dieser paar Elemente, den Elektronen und Lichtteilchen, kriegen wir diese unglaubliche Komplexität, die wir um uns herum haben.

Mit ganz wenig banalen Bausteinen und was ein, also verblüffend banal, wenn man denkt, was man eigentlich um sich herum hat.

Und dann interessiert einen, wenn man diese Sichtweise hat, eher, wie kommt es eigentlich dazu, wie die makroskopischen Eigenschaften der Materie zustande kommen mit so wenigen Bausteinen.

Man wird in den Bausteinen nie ansehen, dass es so etwas gibt wie Schmetterlinge.

Und trotzdem gibt es die.

Das heißt, irgendwas passiert da, irgendwie kann aufgrund des Zusammenspiels der Bausteine, ein Grad der Komplexität, eine ganz neue Organisationsform bis schließlich Leben, eines der größten Wunder, wenn man es aus der Sicht der Bestandteile betrachtet, entstehen.

Deshalb, das ist eine Richtung, wo man nicht unbedingt die Frage hat, was ist die grundlegende Gleichung, weil man sagt, na, ich habe die Schrödinger Gleichung, von mir aus auch relativistische Variante dazu.

Aber man würde denken, so die Grundgleichung und die Grundbausteine verstehen wir.

Wir verstehen aber nicht, wie wir von den Bausteinen immer zu der Komplexität kommen.

Wir können vielleicht verstehen, wie ein Wassermolekül zustande kommt.

Wir können vielleicht rechnen, wie ein Benzolmolekül zustande kommt.

Aber ab einem gewissen Punkt, da fangen wir an, irgendwie mit neuen Konzepten rumzubasteln, ohne dass sozusagen, ohne Unterbrechung von der mikroskopischen zur makroskopischen Beschreibung gegangen wird.

Weil wir häufig dann nicht wissen, wie das geht.

Das ist sozusagen die eine Strömung.

Aber es gibt auch die andere Strömung in der Physik, die sagt, hm, was haben wir denn eigentlich, die vollständigen Gleichungen?

Könnte sein, dass die grundlegenden Gleichungen der Natur anders aussehen.

Und zum Beispiel, was ich als Standardmodell der Teilchenphysik angepriesen hatte, das ist so ein bisschen ein genereller Konsens im Moment, was so die bekannten elementaren Teilchen der Natur sind und was so die Natur im Wesentlichen ausmacht.

Aber wie ich schon gesagt habe, ein Großteil von denen schlägt sich so in unserer alltäglichen Welt nicht so explizit nieder.

Hat also was so die Komplexität der Materie, so wie wir sie verstehen, nicht direkt was damit zu tun.

Aber man kann trotzdem die Frage stellen, sind die Gleichungen, mit der wir arbeiten, nicht halt einfach nur in gewissem Sinn eine Näherung, die zwar für unseren Alltag total gut ist, so wie Newton-Gleichungen schlecht sind, um einen Tennisball, der durch die Luft fliegt, zu beschreiben.

Da muss ich auch nicht Quantenmechanik dafür machen.

Man kann fragen, wie würden denn die grundlegenden Gleichungen aussehen?

Und die Leute, die in der Elementarteilchenphysik sind, würden argumentieren, dass es gute Gründe gibt anzunehmen, dass die Gleichung, die wir als das Standardmodell der Teilchenphysik bezeichnen, diese spezifische relativistische Quantenfeldtheorie, die ich vorhin einmal angesprochen hatte, dass die nicht das Ende aller Erkenntnis sein kann.

Und da gibt es dann natürlich Versuche dort, das zu erweitern, zu verstehen, wann es zusammenbricht, nach Effekten zu suchen, die eben vom Standardmodell nicht erfasst werden.

Das ist immer der Zweck, zu hinterfragen, ob man wirklich der Weisheit letzter Schluss gefunden hat.

Es ist nur eine Frage in sich, ob das überhaupt, wie soll ich sagen, konzeptionell

sein kann.

Kann es die ultimative Gleichung geben?

Neulich wurde mir bei der PTB, hat deren Präsident mir neulich gesagt, dass sie daran arbeiten, die Naturkonstanten, wie nennt man das, wenn es keine Konstante ist, die Naturkonstante zu relativieren.

Ja, oder die zeitliche Änderung zu detektieren.

Genau.

Wie prinzipiell.

Atomuhren.

Genau.

Sie sagten, ich brauche für den Tennisball keine Quantenmechanik.

Wie würde der Tennisball aussehen, oder anders, was würden Sie sehen, wenn Sie Quantenmechanik mit dem Tennisball machen?

Das gleiche wie mit der klassischen Mechanik.

Deshalb verhält er sich ja wie in der klassischen Mechanik.

Weil unsere Sichtweise ist ja, dass klassisches Verhalten eine Näherung ist zum quantenmechanischen Verhalten.

Das heißt, wenn wir klassisches Verhalten sehen, sehen wir das, was wir quantenmechanisch sehen würden.

Nur, dass es irrwitzig umständlich ist, den Tennisball quantenmechanisch zu

rechnen, deshalb machen wir es nicht.

Weil er so viele Moleküle hat.

Weil er so viele Bestandteile hat, ja, ganz genau.

Und es ist einfach einfacher, das Ganze zu reduzieren.

Zum Tennisball in erster Näherung, wenn er durch die Luft fliegt, einfach nur zu sagen, das ist ein Punktteilchen.

Und nur zu sagen, ich beschreibe ihn einfach erstmal nur dadurch, dass er eine gewisse Masse hat.

Und ich folge praktisch nur der Position zu jedem Zeitpunkt und der Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt.

Dann hat man schon das einfachste Modell.

Da kommt man schon relativ weit.

Natürlich, wenn man dann detaillierter werden will, dann muss man Luftreibung berücksichtigen.

Muss man vielleicht auch die Möglichkeit der Deformation, der Ball ist kein absolut starrer Körper.

Rotation des Balls, all diese Dinge.

Dann wird es immer komplizierter.

Und das quantenmechanisch zu machen, wo Quantenmechanik immer dann ideal ist, wenn wir wirklich es auf seine mikroskopischen Bestandteile zu legen können, das ist nicht einfach.

Klar könnte man versuchen, eine Art quantenmechanisches Modell vom Tennisball zu basteln.

Aber wenn man dann Dinge bekommen würde, die nicht zur klassischen Mechanik passen, würden wir heute annehmen, dass das suggeriert, dass die Art und Weise, wie wir das quantenmechanische Modell gebastelt haben, nichts mit der Quantenmechanik zu tun hätte, wenn wir den Ball komplett aus mikroskopischen Bestandteilen aufgebaut hätten.

Also wir hätten das falsche quantenmechanische Modell gelöst.

Und das versucht man nicht.

Aber ich hatte ja schon vorhin gesagt, es gibt makroskopische Quantenmaterie oder es gibt Effekte wie eben Sehen oder Leitfähigkeit vom Stück Kupfer.

Das ist ja eine Manifestierung, wir rechnen es quantenmechanisch und wir können die Leitfähigkeit vom Stück Kupfer ausrechnen.

Wenn wir einen Strom durch ein Stück Kupfer schicken, das zeigt ja, wir haben makroskopische Eigenschaften.

Aber auch da kann ich doch, ich muss doch einfach nur messen, wie viel Strom hinten rauskommt, dann weiß ich doch, wie leitfähig das ist.

Ja natürlich, aber ich will sagen, Sie können es erklären aufgrund der Quantenmechanik.

Und zwar aufgrund von nichts außer dem Wissen, wie die Kupferatome, in welchem Abstand die sitzen, also Sie müssen praktisch das Kristallgitter vom Kupfer kennen, Sie müssen wissen, dass da Elektronen drin sind.

Der Rest sagt Ihnen die Quantenmechanik.

Es gibt, Sie rechnen es komplett aus.

Und Sie können mit Hilfe von klassischer Mechanik und Coulomb-Kräften die Leitfähigkeit, Eigenschaften von Materie nicht verstehen.

Oder dass die Materie Dichte ist, was sie ist.

Dass eben Atome so groß sind, wie sie sind.

Ist ein rein quantenmechanischer Effekt.

Ich hatte ja schon mal gesagt, klassisch könnte das Elektron quasi mit einem ganz kleinen Radius fast auf dem Kern drauf sitzen.

Warum nicht?

Können Sie machen.

Dadurch könnten wir viel dichtere Materie haben.

Und warum nicht?

Und warum nicht?

Das ist eine legitime Frage.

Also eine Sichtweise, die man da bieten kann ist, eine der Effekte, die es in der Quantenmechanik gibt, und eine der berühmten Aussagen der Quantenmechanik ist das sogenannte Heisenbergsche Unschärfeprinzip, die Unschärferelation.

Stimmt, das gab es auch noch.

Das ist auch etwas, was in Quantenmechanik einfließt, was ich noch nicht gesagt

habe.

Und die Unschärferelation sagt etwas darüber aus, dass es, wenn man ganz konkret unserem Elektron, dem Wasserstoffatom, einen Ort zuordnen möchte, also sagen will, es sitzt an diesem Punkt XYZ und es bewegt sich mit Geschwindigkeit V_X , V_Y , V_Z .

Dann sagt die Quantenmechanik, ich kann Ort und Geschwindigkeit, oder man sagt Impuls in dem Zusammenhang der Unschärferelation, nicht beliebig genau angeben.

Und zwar derart, dass wenn ich das Produkt der beiden Unschärfen bilde, das Produkt nie kleiner sein kann im Wesentlichen als das Planck'sche Wirkungsquantum.

Und das hat eine interessante Aussage, das heißt, wenn Sie versuchen würden, das Elektron perfekt zu lokalisieren am Ort des Kerns, würden Sie die Unschärfe, ΔX nenne ich die mal, gegen Null gehen lassen.

Aber die Aussage war doch in der Unschärferelation, das Produkt, ΔX mal ΔP , also Impulsunschärfe, kann nie kleiner werden als Planck'sches Wirkungsquantum.

Wenn also das Produkt nie kleiner werden kann und Sie wollen das Elektron immer mehr lokalisieren, dann wird Ihr Impuls unendlich unscharf.

Und das führt dazu auch, dass Sie dem Elektron unendlich hohe Energien geben würden und im Wesentlichen auch nicht mehr gebunden wäre.

Also weder gut gebunden noch, Sie können praktisch nicht sinnvoll, dass die Unschärferelation erfüllen, indem Sie versuchen, das Elektron immer stärker am Ort des Kerns zu lokalisieren.

Sie bräuchten, um das zu können, beliebig viel Energie Spielwiese, um das zu

kriegen.

Und der Grundzustand vom Wasserstoffatom ist so ein Kompromiss, dass Sie das Elektron nicht zu stark delokalisieren, also nicht zu weit weg haben, weil wenn es zu weit weg ist, dann können Sie ja nicht die anziehende Kraft so gut nutzen.

Also das Elektron möchte schon im Nähe Kern sein, aber gleichzeitig, wenn es zu stark lokalisiert wäre, hätten Sie zu viel Energie und Schärfe.

Ja, im gewissen Sinn würde das passieren.

Und der Kompromiss ist halt, im Wesentlichen kann man mithilfe von Unschärferelationen, kann man sich ein Argument überlegen, warum das Atom nicht viel kleiner, nicht viel größer sein kann im Grundzustand, als was es ist.

Angeregte Zustände, wo das Elektron dann irgendwann im Mittel weit weg ist, oder vielleicht sogar komplett weggelöst, die kann man erzeugen.

Aber Zustände, wo das Elektron langfristig stark lokalisiert ist, die kann man nicht erzeugen.

Und wie gesagt, die Ausdehnung der Materie, man könnte sagen, die charakteristische Ausdehnung des Atoms und die Abstände zwischen Atomen, das ist im Wesentlichen so etwas wie eine Kugel neben der anderen, hängen mit einer Quanteneigenschaft zusammen.

Und diese charakteristische Radius vom Wasserstoffatom ist proportional zum Planck'schen Wirkungsquantum.

Wenn das Planck'sche Wirkungsquantum, was eben die Quantenmechanik sozusagen auszeichnet, wenn Sie das gegen Null gehen lassen würden, dann würde in dem Sinn auch das Atom gegen Null schrumpfen.

Das heißt, diese Quantennaturkonstante gibt Ihnen eigentlich ein Maß für die Ausdehnung von Atomen und dadurch für den Abstand von Atomen in dichter Materie, also so etwas wie Festkörpern und Flüssigkeiten, und hängt damit direkt mit einer Quantennaturkonstante zusammen, nämlich dem Planck'schen Wirkungsquantum.

Es hängt noch mit ein paar anderen Sachen zusammen, aber so im Kern dessen, wovon wir hier reden, geht es ums Planck'sche Wirkungsquantum, weil das ist, was auch direkt in die Unschärferelation eingeht.

Das Produkt der beiden Unschärfen kann nie kleiner sein.

Das heißt, wenn Sie jetzt eine versuchen beliebig klein zu machen, dann wird das andere beliebig groß.

Und das funktioniert nicht.

Ein Effekt, der vielleicht noch ganz interessant ist in der Quantenphysik, das ist der sogenannte Tunneleffekt.

Der Tunneleffekt, von dem habe ich auch schon mal irgendwo gehört, aber...

Also der Tunneleffekt, das ist etwas, was man auch so klassisch nicht erwarten würde.

Da muss man sich vielleicht ein bisschen so vorstellen, ein Teilchen hat eine Wand vor sich, und wenn das Teilchen über die Wand drüber springen kann, klar kann es auf die andere Seite, aber wenn es sozusagen nicht über die Wand drüber springen kann, sondern nur durch die Wand durchgehen müsste, aber das halt nicht kann, weil die Wand nicht durchlässig ist, dann wird es sozusagen zurückprallen in der klassischen Welt und nicht durchgehen.

Und in der quantenmechanischen Welt, also ich muss dazu sagen, wenn ich das jetzt, den Tunneleffekt genau erklären will, die Analogie, die ich gerade gegeben

habe, ist nicht ganz inakkurat, aber man muss diese Wand quasi ersetzen durch eine sogenannte potenzielle Energiebarriere.

In anderen Worten, wenn das klassische Teilchen, das sich auf die Wand zubewegt, eine Energie hat, die kleiner ist als die potenzielle Energiebarriere, also wie eine Art Berg, vor dem man sich stehen sieht, und die Energie eben kleiner ist als diese Bergspitze, dann wird das klassische Teilchen auf die Wand zufliegen, die Wand erreichen und dann reflektiert werden und in die andere Richtung zurückfliegen.

Also es prallt ab.

Das quantenmechanische Teilchen, lustigerweise, bei der gleichen Energie, hat eine endliche Wahrscheinlichkeit, durch die Wand durchzutunneln.

Das nennt man als Tunneleffekt.

Das hat also die Möglichkeit, dass es mit einer kleinen Wahrscheinlichkeit auf der anderen Seite der Wand ankommen kann.

Das ist was komisches.

Jetzt ist so dieser Effekt, der wird immer unwahrscheinlicher, je dicker die Wand wird.

Wenn die Wand sehr sehr dick wird, dann kann man auch für das quantenmechanische Teilchen diesen Effekt praktisch ausschalten.

Aber was macht es dann?

Prallt es dann sofort ab oder dringt es ein Stück ein?

Es dringt ein ganz ganz klein bisschen ein.

Ganz klein bisschen, ja, es tut das.

Und das ist auch der Grund, warum eine dünne Wand funktioniert.

Weil wenn die Eindringtiefe so groß ist, wie die Wand dick ist, dann kommt es ein bisschen auf der anderen Seite raus.

Und wenn irgendwann das Ding so breit ist, dass man halt zwar ein bisschen eindringt, aber dann ist Schluss, dann kommt es halt nicht auf der anderen Seite raus.

Aber die Tatsache, dass das überhaupt möglich ist, grundsätzlich, zumindest bei dünnen Wänden, wo das klassische Teilchen sofort kapitulieren wird und sagen wird, "Ne, da komme ich einfach nicht durch und es auch nicht kann, quantenmechanisch kann das das, es kann tunneln."

Wenn Sie sagen, quantenmechanisch kann das das, heißt das, Sie können ausrechnen, dass es das tut oder ist das auch schon gesehen worden?

Beides.

Wir können ausrechnen, dass es das tut und wir können laute Effekte sehen, wo es das tut.

Also es gibt da sicherlich auch in der Festkörperphysik ganz praktische Anwendungen von Tunneleffekten.

Wissen Sie auch, wie es das tut?

Wie es das tut?

Ja, wieso kann das das?

Aha.

Also dazu muss man sich erstmal fragen, warum kann es das klassisch nicht?

Der Grund, warum es das klassisch nicht kann...

Dichte Frage, oder?

Nein.

Ne?

Weil mein Argument war ja, ich hatte ja nur von meinem Teilchen gefordert, dass ich...

Das Teilchen bewegt sich in einem potenziellen Energiefeld.

Und wodurch die potenzielle Energie zustande kommt, das sei mal dahingestellt, aber sagen wir mal, an jedem Ort im Raum fühlt das Teilchen eine gewisse potenzielle Energie.

Eine potenzielle Energie vom Ort, wo sich das Teilchen gerade befindet.

Und die Aussage war, wo die Wand ist, ist die potenzielle Energie höher als die Energie, die das Teilchen hat.

Und das hat folgende Konsequenz.

In der klassischen Mechanik, wenn sich das Teilchen, das das rumfliegt und auf die Wand zufliegt, es erfüllt das Prinzip der Energieerhaltung.

Und das bedeutet, Energie besteht aus zwei Teilen.

Kinetische Energie und potenzielle Energie.

Wenn das Teilchen außerhalb der Wand ist, dann ist die potenzielle Energie klein und dementsprechend ist die Gesamtenergie ein bisschen potenzieller Energie plus viel kinetische Energie.

Das heißt, das Teilchen kann sich bewegen.

Sobald also jetzt aber das Teilchen an einen Punkt kommt, wo die potenzielle Energie so groß ist wie die gesamte Energie des Teilchens, dann bleibt nichts übrig für Bewegungsenergie.

Weil es seine potenzielle Energie erhöht.

Ja, weil wenn die potenzielle Energie so groß ist wie die Energie des Teilchens und die Summe potenzieller Energie plus kinetische Energie ist Gesamtenergie, dann ist offenbar in dem Moment, wenn die gleich sind, bleibt keine kinetische Energie übrig und die wird null.

Wenn man jetzt innerhalb der Wand wäre, wo die potenzielle Energie größer ist als die Energie des Teilchens, dann ist der einzige Weg, wie kinetische Energie plus potenzielle Energie immer noch gleich der reinkommenden Energie wäre, wenn die kinetische Energie negativ geworden wäre.

Und die kinetische Energie in der klassischen Mechanik...

Die kann nicht negativ werden.

Die kann nicht negativ werden.

Die ist ein halb mv^2 , also halbe mal Masse mal Geschwindigkeitsmq².

Die kann nie negativ werden.

Und deshalb ist eine klassische Mechanik überhaupt nicht möglich, dass es eindringen kann, weil das ist klassisch, wie wir sagen, ein verbotener Bereich.

Die quantenmechanische Schrödinger Gleichung, die die Energieerhaltung beschreibt, die sogenannte zeitunabhängige Schrödinger Gleichung, die Art und Weise, wie die kinetische Energie in der Quantenmechanik in Erscheinung tritt, erlaubt für die negative Werte.

Und erlaubt dadurch im gewissen Sinn die Möglichkeit in diesen Bereich einzudringen.

Man sagt ab und zu, das Teilchen kann darin eine komplexe Geschwindigkeit haben, eine imaginäre Geschwindigkeit.

Vielleicht haben Sie schon mal von komplexen Zahlen gehört.

Komplexe Zahlen sind die, wo es die imaginäre Einheit gibt.

Und die imaginäre Einheit ist eine Zahl, wenn Sie sie quadrieren, kriegen Sie -1 .

Normale, reelle Zahlen, wenn Sie die quadrieren, kriegen Sie immer positive Zahlen.

Aber die imaginäre Einheit quadriert ist -1 .

Und die quantenmechanischen Gleichungen, anders als die Gleichungen, die Sie kennen aus der Newton'schen Mechanik, da stehen komplexe Zahlen drin.

Die grundlegenden Schwarz-Röntgen-Gleichungen hatten -1 , die imaginäre Einheit, irgendwo herumfahren.

Und die Art und Weise, wie man kinetische Energie überführt von der klassischen Mechanik in die Quantenmechanik, da tritt ein -1^2 auf.

Und auf die Weise passiert da etwas, was eben in der klassischen Mechanik nicht existiert.

So, das können Sie jetzt an Ihrer Tafel berechnen.

So weit komme ich mit.

Ja, genau.

Wie sieht das Experiment aus?

Wie gebe ich einem Teilchen negative kinetische Energie mit auf den Weg?

Tut sie nicht.

Im Experiment ist das nicht, was sie...

Sie geben eine reelle Energie, Sie geben eine reelle Geschwindigkeit.

Und es kommt durch.

Und es kommt durch.

Und daraus folgt das...

Was da drin in der Barriere...

Okay, verstehe.

Dass man das ab und zu interpretiert in einer Approximation durch eine komplexe Geschwindigkeit, das ist eine Sichtweise.

Aber das ist nicht...

Die Quantenmechanik erfordert diese Sichtweise nicht.

Aber es ist der Grund, warum, obwohl da überall so etwas steht wie E , Energie ist gleich T , kinetische Energie plus Potentialenergie, die Schrödinger Gleichung, die zeitunabhängige Schrödinger Gleichung hat ein bisschen eine ähnliche Struktur.

Aber das, was T ist, die kinetische Energie, ist ein komisches Objekt, ein Operator, der auf so eine Wellenfunktion wirkt.

Und das gibt es in dieser Form.

Es hängt wieder mit dieser Hilbert-Raum-Struktur zusammen.

Es hängt damit zusammen, dass man sozusagen eine Abbildung hat, die einen Pfeil auf einen anderen Pfeil abbildet.

Und dass so eine Form von Abbildung mit Hilbert-Raum-Struktur, das ist der Grund, warum es so etwas wie Tunneln geben kann.

Also Grund im Sinne von, dadurch kann man es verstehen, wenn man die Gleichung löst, warum das passiert.

Man hat nicht weiterhin hinzufügen müssen.

Man hat ja nicht plötzlich gesagt, ich gebe zur Theorie einen neuen Effekt dazu, damit das halt auch noch kann.

Es tritt ganz natürlich in Erscheinung.

Aufgrund dieser komischen Hilbert-Raum-Struktur, dass man Wellenfunktionsgleichungen löst, dann können da so witzige Sachen passieren.

Ist das zuerst berechnet oder zuerst beobachtet worden?

Tunnel-Effekt.

Würde mich jetzt nicht wundern, wenn irgendwann mal ein Tunnel-Effekt aufgetreten wäre und dann einer zum Theoretiker gegangen wäre und gesagt hätte, hier kannst du mir mal erklären, was ich da gesehen habe?

Ich bin mir nicht sicher, dass das nicht zuerst vorhergesagt wurde.

Also da bin ich mir in der Historie nicht ganz im Reinen.

Manchmal wurden ganz grundlegende Dinge vorhergesagt, also zum Beispiel eine der großen Vorhersagen der Quantenmechanik war die Vorhersage von Antiteichen, dass es zu jedem Elektron ein Antiteichen gibt.

Das Positron, das wurde quasi vorhergesagt von Dirac bei seiner Analyse von seiner relativistischen quantenmechanischen Gleichung.

Da hat das sowas mehr oder weniger aufgrund der mathematischen Struktur der Gleichung, konnte man das folgen.

Da ist noch eine Schraube übrig geblieben beim Zusammenbauen sozusagen.

Könnte man sagen.

Und er hat vorhergesagt und dann hat man später tatsächlich auch experimentell gefunden.

Aber dass so fundamentale Dinge aufgrund von mathematischen Eigenschaften allein vorhergesagt werden, das passiert nicht so häufig.

Aber beim Tunneleffekt, das ist etwas, wenn wir Quantenphysik den Studierenden beibringen, das kann man typischerweise in einer relativ frühen Stufe der Quantenphysik beibringen.

An früherer Stelle, bevor man zu sowas wie Verschränkungen kommt oder so komplexere Dinge.

Das heißt also, die Mathematik, um den Tunneleffekt zu verstehen, die ist gar nicht so kompliziert.

Und das wird auch häufig in Vorlesungen zur physikalischen Chemie, die lernen auch solche Dinge.

Das heißt, es ist nicht unbedingt so sehr schwierig, deshalb könnte ich mir vorstellen, dass es historisch, als die Leute verstanden haben, was die wesentlichen Gleichungen sind, dass die vielleicht da relativ schnell gesehen haben, dass es so einen Effekt gibt.

Also ein Effekt, der historisch bekannt ist, der immer als Tunneleffekt gedeutet wurde, ist der radioaktive Zerfall von Kernen, der als Alpha-Zerfall bezeichnet wird.

Wenn im Alpha-Zerfall bricht aus einem Kern ein Alpha-Teilchen, und ein Alpha-Teilchen ist selbst der Kern eines Heliumatoms, also zwei Protonen, zwei Neutronen, das nennt man Alpha-Teilchen.

Wenn das Alpha-Teilchen aus dem Kern rausfliegt, dann hat es im Wesentlichen sich erstmal befunden innerhalb eines Potentials, wo es sich gut aufgehoben gefühlt hat, und ist durch eine Wand durchgetunnelt.

Und das ist dann dieser Zerfallsprozess.

Das ist der Grund, warum es nicht instantan rausfliegt, weil es braucht eine gewisse Zeit, eine Tunnelrate, oder eine Lebensdauer, mit der es durch diese Barriere durchtunneln kann.

Und die kann man auch quantenmechanisch berechnen.

Und dementsprechend im Bild dieses Tunneleffekts ist der radioaktive Zerfall, den man als Alpha-Zerfall bezeichnet, ein Tunneleffekt von einem Alpha-Teilchen

im Kernpotential.

In der potenziellen Energie, die die Kernumgebung quasi für das Alpha-Teilchen darstellt.

Die Leute haben früh verstanden, wo sie Beispiele finden für solche physikalischen Effekte, aber die Quantenmechanik selber ist nicht entstanden anhand der Kernphysik.

Die Quantenmechanik ist entstanden anhand der Atomphysik, sprich anhand der Elektronenübergänge, nicht anhand des Innenlebens der Kerne.

Ich würde sagen, das ist sogar heute noch ein relativ schwieriges Problem, das quantenmechanische Leben der Kerne quantitativ zu rechnen.

Weil wir keine elementaren Kräfte haben, die die einzelnen Kernteilchen miteinander wechselwirken lassen.

Keine der Kräfte im Standardmodell der Teilchenphysik gibt Ihnen an, was die natürlichen Kräfte zwischen zwei Kernteilchen sind, zwischen zwei Protonen und einem Protonen und einem Neutron.

Im Standardmodell ist die Wechselwirkung zwischen den Kernteilchen mehr so eine Art Rest-Effekt, so eine Art Dreck-Effekt.

Es gibt keine grundlegende Kraft, die das vermittelt.

Und dadurch ist es so schwierig, ein grundlegendes Modell für Kerne zu schaffen.

Aber kann man diese grundlegende Kraft nicht einfach bestimmen, also im Sinne von definieren?

Das ist wie häufig Leute, doch, doch.

Das ist jetzt die Sandra-Kraft?

Ja, doch, die Leute machen sowas in diese Richtung.

Das heißt, man versucht sich da eine Art Kraft hinzuschreiben als Funktion des Abstands von zwei Kernteilchen und von dem Typ der Kernteilchen und versuchen das einfach reinzustecken.

Das ist richtig.

Aber es ist nicht so in dem Sinn herleitbar, so auf einfache Weise.

Also im Sinne dessen, dass man so eine Dinge erklären möchte.

Also es ist immer eine Krücke.

Es ist eine Krücke, das ist halt vielleicht ein Hilfsmittel, mit dem man was rechnen kann.

Und aber dann kommt auch ganz wieder ganz schnell das Problem, wenn Sie mehrere Nukleus-Kernteilchen haben, dann haben Sie wieder das Problem, wie rechnen Sie das quantitativ?

Weil doch die quantenmechanischen Gleichungen so schnell einem um die Ohren fliegen.

Das heißt, man kann sowas vielleicht einigermaßen verlässlich noch für den Kern eines Kohlenstoffatoms machen, aber Sie können zum Beispiel ganz schwer verlässlich die Eigenschaften von exotischen Kernen vorhersagen.

Es gibt ja immer noch die Erwartung, dass es vielleicht jenseits der bekannten schweren Elemente, um so Element 114, 115 herum, dass es vielleicht ein ganzes Stück höher langlebige Elemente geben könnte.

Aber niemand kann verlässliche quantenmechanische Rechnungen für so viele Kernteilchen machen.

Das sind dann ganz grobe Kernmodelle, die einem das hoffen lassen, dass es so Effekte gibt.

Quantitative, hochakkurate kann man da überhaupt nicht rechnen, weil es schon zu viele Quantenteilchen sind.

Also das ist ein Gebet, was auch so ein bisschen, ich würde sagen, heutzutage ein bisschen stiefmütterlich behandelt wird.

Ganz wenige Physiker machen noch quantitative Kernphysik.

Weil es so frustrierend ist?

Weil es zum Teil vielleicht ein bisschen frustrierend ist und vielleicht auch nicht mehr so gefördert wird.

Manchmal ist ja auch die Frage, was ist gerade populär, wo fließen Gelder hin und das hat ja auch einen Einfluss darauf, wie Wissenschaftler ihre Forschung ausrichten.

Und es ist halt auch ein quantenmechanisches Problem, wo man sich eigentlich schon seit ziemlich langer Zeit vor einer Wand stehen sieht.

Und deshalb auch mal ein bisschen vielleicht durchfrustern und sagt, hm, weiter geht's vielleicht nicht.

Wie geht's denn weiter mit der Quantenmechanik?

Gibt's da noch eine Entwicklung oder haben Sie Ihre Gleichungen und wenden die im Wesentlichen nur noch an?

Ja, also, wie ich es schon sagte, die Quantenmechanik in ihren Grundstrukturen, da gibt es zum einen Entwicklungen, wo man mehr verstehen will, wie Quantenmechanik eigentlich so philosophisch zu verstehen ist.

Also weil wir diese komischen Effekte haben, gerade so mit Verschränkung.

Da gibt es verschiedene Sichtweisen, was Verschränkung impliziert im Hinblick auf den Unterschied zur klassischen Mechanik.

Da gibt es Fragen zur Natur der Realität.

Was ist real?

Was kann man Aussagen darüber, was man so sagen kann über so ein Teilchen?

Und dann gibt es philosophische Fragen dazu.

Gibt es Möglichkeiten, doch in einer klassischen Sichtweise Quantenmechanik irgendwie auszuhebeln?

Das ist nicht unbedingt ein Aushebeln der Gleichung, sondern mehr der Sichtweise, was es bedeutet.

Also da gibt es viel, wo Leute sich beschäftigen mit dem, was heißt das Ganze?

Es gibt Leute, die es so denken, aber gleichzeitig gibt es viele, die sagen, so what?

Das ist, wie es ist.

Das ist, wie es ist und das rüttelt nicht an der mathematischen Struktur und wir können mit beliebig hoher Präzision gewisse Dinge ausrechnen.

Zum Teil Sachen ausrechnen mit Genauigkeit von fast 15 Stellen hinterm Komma.

Das ist ziemlich präzise.

Das ist nicht, dass man das hinterfragt, in dem Sinn, ob es richtig ist oder nicht, sondern man hinterfragt, ob man versteht, was es in dem Sinn konzeptionell, weltanschaulich bedeutet.

Ist legitim, aber die Frage ist, ist es ein Muss für Fortschritt im Hinblick auf die Nutzung des Ganzen?

Ja, die Frage, ob der Tritt ans Schienbein real ist oder nicht, die Frage ändert halt nichts daran, dass mir das Schienbein wehtut.

Ja, das ist so ein bisschen, deshalb wenn man da pragmatisch veranlagt ist und ich persönlich gehöre tatsächlich zu den eher pragmatisch veranlagten Leuten, ist diese mehr philosophische Frage vielleicht nicht, was einem so antreibt, aber es ist eine legitime.

Und wenn man aber in die andere Richtung geht und fragt, kann ich denn immer komplexere Systeme behandeln, kann ich verstehen, wie, naja, jetzt mal übertrieben gesagt, dass ich verstehe, wie ein Organismus zustande kommt, wie viel von den Eigenschaften der Quantenmechanik spielen eine Rolle.

Ich würde zum Beispiel sagen, an keiner Stelle ist es fragwürdig, um die chemischen Bindungen zwischen Atomen, die das Material, die auch den lebenden Körper ausmachen, zu verstehen, brauche ich Quantenmechanik.

Aber um die Bewegung von ganzen Molekülteilen, die dann mit anderen Molekülteilen zusammenkommen und dann vielleicht irgendeine biologische Funktion erfüllen, zu verstehen, wenn ich es einfach als eine Art, wiederum jetzt als ganzes, als ein klassisches Objekt behandle, ich interessiere mich nicht mehr dafür, dass intrinsisch für seine Eigenschaften Quantenmechanik notwendig war, aber jetzt, das ist so wie der Tennisball, ich weiß, natürlich besteht es aus

Elektronen und so, aber wenn ich sage, aber ich beschreibe jetzt das Verhalten einfach nur durch irgendwelche Kräfte, die eher so makroskopisch sind zwischen den Teilen, dann kann ich vielleicht da Federn einführen und kann sagen, ja, dieses Protein wechselt weg mit dem Protein und die Bewegung von dem Protein kann ich vielleicht komplett klassisch behandeln.

Vielleicht ist es so und es sieht so aus, als ob man relativ weit kommt mit dieser Sichtweise, aber es könnte sein, dass manche Eigenschaften, selbst auf dieser gröberskaligen molekularen Ebene, vielleicht immer noch Quanteneigenschaften direkt brauchen und wo das genau nicht mehr der Fall ist und wo es vielleicht doch noch der Fall ist, das ist nicht so ganz klar.

Es ist vermutlich schon der Fall, wenn sie mal ganze Zellen haben, das Bewegen der Zellen und so, grob, werden sie vermutlich nicht noch Quantenmechanik brauchen.

Nicht um das zu beschreiben, aber immer wenn sie es erklären wollen aufgrund der Bestandteile, dann kommen sie immer wieder zurück.

Und dann halt diese andere Richtung, wie weit müssen sie vielleicht Quantenmechanik in seiner Grundstruktur hinterfragen, ist die Frage, ob diese generelle, diese Hilbert-Raum-Idee, ob man die hinterfragt, wenn man fragt, gibt es andere Elementarteilchen.

Ist mir nicht so ganz klar, ob man da konzeptionell was Neues braucht oder ob es Experimente gibt, die einem sagen, diese ganze Hilbert-Raum-Struktur, diese ganze Vektorraum-Pfeil-Struktur, das ist vielleicht gar nicht wirklich das Ende der Weisheit.

Das kann man hinterfragen, aber mir ist nicht klar, welche Experimente das überzeugen.

Ich wollte gerade fragen, wodurch würden sie es denn ersetzen?

Also in dem Moment, wo ich sage, naja, vielleicht ist das mit dem Hilbert-Raum ja gar nicht so eine gute Idee, brauche ich hier irgendwas Neues?

Nun, sie würden es dann ersetzen müssen, womit ist eine andere Frage, aber sie würden es dann ersetzen müssen, wenn zum Beispiel die Annahme, die diese Hilbert-Raum-Struktur impliziert, ist ja, dass sie eben diese sogenannten Quantenüberlagerungen bilden können, diese Subposition, die Qubits und so weiter.

Wenn sie Hinweise darauf sehen, dass diese Qubit-Struktur zusammenbricht, wenn man genügend genau misst oder Situationen hat, wo es aus irgendeinem Grund zusammenzubrechen scheint, dann kann man sich fragen, ob dort irgendwie quantenmechanische Grundprinzipien versagen.

Ich bin mir keine Experimente bewusst, wo das bisher der Fall wäre, aber zum Beispiel im Hinblick auf Erweiterung der Teilchenphysik, also die Möglichkeit, dass es Erweiterung gibt dieses Standardmodells, also dieser fast kanonischen relativistischen Quantenfeldtheorie, dafür gibt es schon Gründe.

Also das ist nicht was wir machen, aber zum Beispiel Leute, die sagen, sie wollen verstehen, was ist da dunkle Materie.

Es gibt sehr viel experimentelle Hinweise darauf, dass da irgendwas ist, dessen Natur man nicht versteht und das scheinbar nicht eines der Teilchen ist vom Standardmodell.

Und wenn man versteht, was es ist, muss man zumindest irgendein Standardmodell ersetzen oder erweitern.

Mir ist immer noch nicht klar, dass das bedeutet, dass wir die Grundprinzipien der Quantenphysik per se aufgeben müssen und dass die Erweiterung was grundsätzlich anderes ist.

Es ist vielleicht nicht eine normale Quantenfeldtheorie, es ist vielleicht sogar

sowas wie eine Art Stringtheorie oder so, aber trotzdem gibt man dort auch nicht die Grundprinzipien der Quantenmechanik auf, meines Wissens nach.

Aber trotzdem heißt das nicht, dass es nicht passieren könnte.

Es ist Physik, wir machen Naturwissenschaft, das heißt Gleichung stellen unsere sozusagen Fundament dar, auf dem wir aufbauen, nachdem die sich in vielen, vielen Situationen bewährt haben, heißt aber nicht, dass wir nicht durch neue Beobachtungen unser Denken erweitern müssen.

Meistens ist es ein Erweitern bisher, es ist meistens nicht ganz eine radikale Wende, aber als man, als quasi Planck seine Quantenhypothese aufgestellt hat und dadurch die Schwarzkörperstrahlung erklärt hat im Jahr 1900, das war ein totaler Paradigmenwechsel.

Es ist eine ganz neue Sicht, es hat vielleicht Planck in den ganzen Konsequenzen erstmal nicht gleich so erkannt, aber es hat so viele dramatische Konsequenzen gehabt, für unser grundlegendes Verständnis von Materie und für unsere Möglichkeit auch neue Materialien zu generieren.

Also zum Beispiel, ich hatte vorhin diese Superflüssigkeiten erwähnt, das superflüssige Helium, was man gerne hätte ist eine entsprechende elektronische Superflüssigkeit, das dann ein Supraleitung, also ein Material, wo die Elektronen durchs Material ohne elektrischen Widerstand fließen, so wie man praktisch eine Flüssigkeit hat, die keine Viskosität hat und ohne Viskosität fließt.

Ja, das wäre nicht schlecht, weil das heißt, man hat eine dissipationsfreie Leitung.

Also die Idee ist, dass das etwas attraktives ist und man hat solche Materialien auch schon, schon seit langem kennt man die, aber erst in neuerer Zeit fängt man an, solche Materialien zu generieren, die ihre Supraleitung nicht nur bei Temperaturen von weit, weit, weit unter der Temperatur von flüssigem Stickstoff haben, sondern die langsam so in die Temperatur von flüssigem Stickstoff

herankommen.

Die anderen, da muss man immer mit flüssigem Helium arbeiten, also so absolut null Punkt, weil -273 Grad Celsius, jetzt kommt man mehr so in die Temperaturen von flüssigem Stickstoff.

Das ist natürlich interessant.

Das heißt in zehn Jahren haben wir es auf Zimmertemperatur.

Ja, vielleicht.

Vielleicht, tun wir aus.

Also ich meine, man kann doch nicht sagen, das ist in dem Sinn eine Erweiterung der Quantenmechanik, aber das sind Quanteneffekte und es ist eine neue Anwendung, wenn man das vor allem auch versteht.

Also das Witzige ist, die Leute haben schon seit Jahren Hochtemperatur-Supraleiter, also sicher seit 20 Jahren existieren die, also Hochtemperatur heißt nicht Raumtemperatur, aber höher als flüssig Helium.

Aber bis heute gibt es keinen Konsens, wie die genau funktionieren.

Da ist also eine quantenmechanische Herausforderung aufgrund der Komplexität der Materialien und aufgrund der Komplexität des elektronischen Vielteilchenproblems.

Also wenn man mehr als ein Elektron hat, fliegt einem das Ganze ganz schnell im Sinne der Berechenbarkeit um die Ohren.

Und deshalb ist das so noch ein offenes Gebet.

Man weiß zwar, die Grundgleichung der Natur können wir hinschreiben, also die

Grundgleichung, so wie sie die Materie unseres Alltags beschreiben, können wir hinschreiben.

Wir haben keinen Zweifel, was die sind.

Wir glauben also nicht, dass Supraleitung bei, was weiß ich, -100 Grad Celsius irgendein exotischer physikalischer Effekt ist, im Sinne von neuen Gleichungen oder neuer Quantenmechanik.

Aber die Quantenmechanik zu nutzen, für alles was komplexer ist, die Gleichung zu lösen, ist im Wesentlichen, im großen Ganzen, ein ungelöstes Problem.

Die Lösbarkeit quasi, ist ein ungelöstes Problem.

Was wollten Sie eigentlich werden, als Sie klein waren?

Oh, gute Frage.

Danke.

Also die erste Erinnerung, die ich mich als Kind, da war ich so im Grundschulalter, mein erstes Berufsziel war Ambulanzbettenträger.

Das hat mich extrem beeindruckt.

Ich hatte da eine Fernsehserie gesehen, da waren Leute, die mit viel Enthusiasmus Leute, die in Not waren, auf Bahn gelegt sind, mit viel Enthusiasmus mit den Leuten schnell zur Ambulanz gerannt haben, versucht die schnell ins Krankenhaus zu bringen.

Die durch die nächste Tür zu tunneln.

Das hat mich so beeindruckt und ich hab gedacht, da geht was, da ist Action und die Leute tun was Nützliches.

Das hat mich beeindruckt, deshalb war das damals mein Berufsziel, Ambulanzbettenträger.

Und wie sind Sie dann Quantentheoretiker?

Ja irgendwie hab ich mich da weg bewegt von Ambulanzbettenträgern.

Auf die schiefe Bahn geraten.

Also das ist ganz witzig, das ist glaube ich im Wesentlichen passiert, das ist klischeehaft, aber es ist wahr.

Etwa zur Zeit, als ich Abitur gemacht habe, vielleicht ein, zwei Jahre vorher, kam tatsächlich dieses Buch raus, "A Brief History of Time" von Stephen Hawking.

Die kurze Geschichte der Zeit und das war ja ein Riesenerfolg, populärwissenschaftlich.

Und ich war damals milde an Physik interessiert, muss ich sagen.

Ich hatte tatsächlich als Leistungskurs Altgriechisch, also als wir noch Leistungskurse hatten, hatte ich Altgriechisch und Chemie.

Also ich hab da ein bisschen so beides gemacht, aber ich hatte nicht Physik, auch nicht Mathematik.

Und fand das beides spannend und hab aber damals parallel dann solche Dinge angefangen zu lesen, gerade Hawking, aber andere haben ja auch populärwissenschaftliche Bücher geschrieben.

Auch Sachen von Roger Penrose und das hat mich beeinflusst.

Und dann hab ich Physikvorlesungen gemacht, hab tatsächlich mit

Chemiestudien begonnen, hab nach einem halben Jahr auf Physik gewechselt, weil ich gemerkt habe, das ist spannender für mich.

Und hab dann gemerkt, ich bin gut in Mathematik und dadurch ist das so passiert.

Ich bin da mehr oder weniger reingetunnelt, weil ich gemerkt habe, wo ich gut war.

Es war nicht so sehr in den praktischen Dingen, experimentell, ich war nicht ungeschickt, aber sicherlich nicht unbedingt so talentiert, wie es andere sind.

Aber ich hab gemerkt, in manchen Bereichen, wo andere Schwierigkeiten haben, hatte ich gewisse Vorteile, gewisse Stärken.

Gerade in so der Mischung Mathematik mit Numerik, also mit Simulation zusammenzubringen, das war so ein bisschen, was dann zu meinem Steckenpferd geworden ist und da hatte ich Spaß daran.

Und es war auch ein Gebiet, wo ich gesehen habe, man kann gut zu experimenteller Realität einen Brückenschlag machen und das hat mir Spaß gemacht und dadurch bin ich da reingekommen.

Ist das was, was man lernen kann oder muss man da wirklich ein Talent für haben?

Ich kann es nicht universell sagen, aber mein Eindruck ist, dass manche Leute sich schwerer tun mit den Dingen als andere.

Welche tun sich leichter?

Also ich kann nicht sagen, es gibt Leute, die tun sich da leichter damit, wenn sie ein gewisses mathematisches Abstraktionsvermögen haben und nicht immer ein anschauliches Bild haben wollen.

Ich hatte ja vorhin schon gesagt, ich denke gerne in Gleichungen und bin total zufrieden damit, dass ich die Gleichung visualisieren kann und das Manipulieren der Gleichung, damit komme ich gut zurecht.

Und ich glaube Leute, die damit schwieriger zurecht kommen, haben größere Schwierigkeiten, die vielleicht auch sehr durch Intuition gelenkt sind.

Also das ist zum Beispiel bei mir etwas, ich habe zwar einen Zugang zu Intuition, ich will auch nicht sagen, ich habe gar keine, aber ich habe mir angewöhnt, fast immer alles in Frage zu stellen, was ich erst mal intuitiv denke.

Ich habe festgestellt, wenn man es wirklich durch X kommt, also sprich die Gleichung löst, kommt man häufig zu einem anderen Ergebnis und da hat einem die Intuition fehlgeleitet.

Deshalb bin ich da so skeptisch, andere zum Teil aus vielleicht optimistischer Grundeinstellung heraus weniger, dass die vielleicht mehr geeignet sind, einfach ich probiere halt mal aus.

Und ein Experiment, ich will nicht sagen, das heißt nur ich probiere mal aus, weil ein ernsthaftes Experiment, also gerade ein Experiment, wie zum Beispiel auch Teilchenphysiker sich das machen, das ist ja nicht nur ich probiere mal aus, die planen das ja.

Schaut man eben in X -Feld ein und werft da eine Currywurst rein.

Ganz genau, so läuft das nicht, da ist viel Planung drin.

Aber irgendwo ist da wohl ein bisschen ein Einstellungsunterschied, wie man an Dinge herangeht, wo man sich wohler fühlt, wo man vielleicht glaubt, man kann mehr erreichen und mehr sich nützlich einbringen.

Ich habe immer das Gefühl gehabt, Experiment ist klasse Sache, ich war da nie

dagegen und bin immer noch ein großer Verfechter der Notwendigkeit, weil der Erste, der sagen würde, wenn Theorie da entkoppelt ist, dann ist das schlecht.

Aber es ist gleichzeitig so, dass ich gemerkt habe, mein Talent war da nicht das stärkste und hat bei anderen Leuten gemerkt, das was ich kann, das sind die vielleicht nicht so stark.

Deshalb habe ich das dann kultiviert, nicht unbedingt aus mangelndem Interesse, sondern einfach nur, das was ich gut kann, ist halt ein bisschen was anderes, als was vielleicht andere so gut können.

Ist ja auch weniger anstrengend, wenn man das macht, was man gut kann.

Ist weniger anstrengend und man hat vielleicht dann eine Nische, wo man dann erfolgreich sein kann.

Das war so ein bisschen bei mir das Leitprinzip.

Romin Sandra, vielen Dank.

Ja, bitteschön.

Danke schön.

Ich bin sehr dankbar, dass ich mit euch hier sein durfte.

Ich bin sehr dankbar, dass ich mit euch hier sein durfte.

Ich bin sehr dankbar, dass ich mit euch hier sein durfte.

Ich bin sehr dankbar, dass ich mit euch hier sein durfte.

Ich bin sehr dankbar, dass ich mit euch hier sein durfte.

Ich bin sehr dankbar, dass ich mit euch hier sein durfte.

Ich bin sehr dankbar, dass ich mit euch hier sein durfte.

Ich bin sehr dankbar, dass ich mit euch hier sein durfte.

Ich bin sehr dankbar, dass ich mit euch hier sein durfte.

Ich bin sehr dankbar, dass ich mit euch hier sein durfte.

Ich bin sehr dankbar, dass ich mit euch hier sein durfte.

Ich bin sehr dankbar, dass ich mit euch hier sein durfte.

Ich bin sehr dankbar, dass ich mit euch hier sein durfte.

Ich bin sehr dankbar, dass ich mit euch hier sein durfte.

Ich bin sehr dankbar, dass ich mit euch hier sein durfte.

[MUSIK]