

Unverkäufliche Leseprobe

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Text und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlags urheberrechtswidrig und strafbar. Dies gilt insbesondere für die Vervielfältigung, Übersetzung oder die Verwendung in elektronischen Systemen.



Sabine Hossenfelder

DAS HÄSSLICHE UNIVERSUM

Warum unsere Suche nach Schönheit
die Physik in die Sackgasse führt

Aus dem Englischen
von Gabriele Gockel
und Sonja Schuhmacher,
Kollektiv Druck-Reif

S. FISCHER



Erschienen bei S. FISCHER
3. Auflage Dezember 2018

Die Originalausgabe erschien unter dem Titel
»Lost in Math. How Beauty Leads Physics Astray«
im Verlag Basic Books, New York
© Sabine Hossenfelder 2018

Für die deutschsprachige Ausgabe:
© 2018 S. Fischer Verlag GmbH,
Hedderichstr. 114, D-60596 Frankfurt am Main

Gesamtherstellung: CPI books GmbH, Leck
Printed in Germany
ISBN 978-3-10-397246-7

Inhalt

Vorwort	9
Erstes Kapitel	
Die verborgenen Regeln der Physik	11
In welchem ich feststelle, dass ich die Physik nicht mehr verstehe. Ich spreche mit Freunden und Kollegen, merke, dass ich nicht die Einzige bin, die ratlos ist, und schicke mich an, die Vernunft wieder auf den Boden zurückzuholen.	
Zweites Kapitel	
What a Wonderful World.....	31
In welchem ich eine Menge Bücher über Tote lese und herausfinde, dass jeder hübsche Ideen mag, dass aber hübsche Ideen zuweilen nicht recht funktionieren. Bei einer Konferenz packt mich die Sorge, dass Physiker im Begriff sind, die wissenschaftliche Methode zu verwerfen.	
Drittes Kapitel	
Zur Lage der Nation	62
In welchem ich zehn Jahre Ausbildung auf ein paar Seiten zusammenfasse und über die glorreichen Tage der Teilchenphysik plaudere.	

Viertes Kapitel

Risse im Fundament.....	93
--------------------------------	----

In welchem ich mich mit Nima Arkani-Hamed treffe und mir alle Mühe gebe zu akzeptieren, dass erstens die Natur nicht natürlich ist, dass zweitens alles, was wir herausfinden, toll ist und dass drittens sich keiner einen Dreck darum schert, was ich denke.

Fünftes Kapitel

Ideale Theorien	119
------------------------------	-----

In welchem ich das Ende der Wissenschaft suche und feststelle, dass die Phantasie der theoretischen Physiker endlos ist. Ich fliege nach Austin, lasse einen Vortrag von Steven Weinberg über mich ergehen und erkenne, dass wir Vieles nur machen, um der Langeweile zu entkommen.

Sechstes Kapitel

Die unbegreifliche Begreifbarkeit der Quantenmechanik.....	159
---	-----

In welchem ich über den Unterschied zwischen Mathematik und Magie nachsinne.

Siebtes Kapitel

Eine für Alles.....	183
----------------------------	-----

In welchem ich versuche herauszufinden, ob sich irgendjemand für die Naturgesetze interessieren würde, wenn sie nicht schön wären. Ich mache Zwischenstopp in Arizona, wo mir Frank Wilczek seine kleine Theorie von etwas erläutert, dann fliege ich nach Maui und höre, was Garrett Lisi zu sagen hat. Ich mache Bekanntschaft mit hässlichen Tatsachen und zähle Physiker.

Achtes Kapitel

Der Weltraum, unendliche Weiten	223
--	-----

In welchem ich versuche, einen Stringtheoretiker zu verstehen, und mir das fast gelingt.

Neuntes Kapitel

Das Universum, alles, was da ist, und der ganze Rest	254
---	-----

In welchem ich die vielen Erklärungen bewundere, warum niemand die Teilchen sieht, die wir erfinden.

Zehntes Kapitel

Wissen ist Macht	289
-------------------------------	-----

In welchem ich zu dem Schluss komme, dass die Welt ein besserer Ort wäre, wenn alle auf mich hören würden.

Anhang A	309
-----------------------	-----

Anhang B	311
-----------------------	-----

Anhang C	314
-----------------------	-----

Danksagung	320
-------------------------	-----

Anmerkungen	322
--------------------------	-----

Register	346
-----------------------	-----

Erstes Kapitel

Die verborgenen Regeln der Physik

In welchem ich feststelle, dass ich die Physik nicht mehr verstehe. Ich spreche mit Freunden und Kollegen, merke, dass ich nicht die Einzige bin, die ratlos ist, und schicke mich an, die Vernunft wieder auf den Boden zurückzuholen.

Das Dilemma des guten Wissenschaftlers

Ich erfinde neue Naturgesetze; damit bestreite ich meinen Lebensunterhalt. Ich bin eine von etwa zehntausend Forschern, deren Aufgabe darin besteht, unsere Theorien zur Teilchenphysik zu präzisieren. Im Tempel des Wissens sind wir diejenigen, die im Keller graben und die Fundamente einer gründlichen Prüfung unterziehen. Wir untersuchen die Risse, die Verdacht erregenden Bestandteile der vorhandenen Theorien, und wenn wir auf etwas stoßen, ziehen wir Experimentatoren hinzu, um tiefere Schichten freizulegen. Im vergangenen Jahrhundert erwies sich diese Arbeitsteilung zwischen Theoretikern und Experimentatoren als sehr fruchtbar. Meine Generation hat damit nun erstaunlich wenig Erfolg.

In den zwanzig Jahren meiner Beschäftigung mit theoretischer Physik sah ich die meisten Wissenschaftler, die ich kenne, Karriere machen, indem sie Dinge untersuchten, die niemand je gesehen hat. Sie haben wahnwitzige Theorien ausgebrütet wie die, dass unser Universum nur eines in einer unendlichen Zahl von Universen sei, die zusammen ein »Multiversum« bilden. Sie haben Dutzende neuer Teilchen erfunden und erklärt, wir seien Projektionen eines Raums höherer Dimension, der durch Wurmlöcher hervorgebracht werde, die weit voneinander entfernte Orte miteinander verbänden.

Diese Thesen sind zwar höchst umstritten, aber äußerst beliebt; sie sind spekulativ, aber faszinierend; schön, aber nutzlos. Die meisten Thesen lassen sich so schwer überprüfen, dass sie praktisch unüberprüfbar sind. Andere sind sogar theoretisch unüberprüfbar. Und alle werden von Theoretikern vertreten, die davon überzeugt sind, dass ihre mathematischen Formeln einen Kern der Wahrheit über die Natur enthalten. Ihre Theorien sind, so glauben sie, zu gut, um falsch zu sein.

Die Erfindung neuer Naturgesetze – die Weiterentwicklung von Theorien – wird nicht in Seminaren gelehrt und auch nicht in Lehrbüchern erklärt. Physiker erlernen sie zum Teil beim Studium der Wissenschaftsgeschichte, doch das meiste übernehmen sie von älteren Kollegen, Freunden und Mentoren, Vorgesetzten und Kritikern. Von einer Generation an die nächste weitergegeben, beruht der Großteil dieser Kunst auf Erfahrung, einer mühsam erworbenen Intuition für das, was funktioniert. Aufgefordert, die Aussichten einer neu erfundenen, aber noch nicht geprüften Theorie zu beurteilen, greifen Physiker auf Begriffe wie Natürlichkeit, Einfachheit oder Eleganz sowie auf Schönheit zurück. Diese verborgenen Prinzipien sind überall in der Grundlagenphysik zu finden und von unschätzbarer Bedeutung. Und sie stehen im krassen Widerspruch zum wissenschaftlichen Imperativ der Objektivität.

Die verborgenen Prinzipien haben uns einen Bärendienst erwiesen. Obwohl wir eine Fülle neuer Naturgesetze aufgestellt haben, bleiben sie allesamt unbestätigt. Und während ich Zeugin wurde, wie meine Disziplin in die Krise geriet, rutschte ich selbst in eine Krise. Ich bin mir nicht mehr sicher, ob das, was wir in der Grundlagenphysik machen, Wissenschaft ist. Und wenn nicht, warum verschwende ich dann meine Zeit damit?

Ich habe mich für die Physik entschieden, weil ich das menschliche Verhalten nicht verstand. Weil die Mathematik Klartext redet. Mir gefiel die Reinheit, die unzweideutige Vorgehensweise, die Herrschaft der Mathematik über die Natur. Was mich jetzt, zwei Jahrzehnte später, daran hindert, die Physik zu verstehen, ist, dass ich noch immer das menschliche Verhalten nicht verstehe.

»Wir können keine exakten mathematischen Regeln nennen, die Auskunft darüber geben, ob eine Theorie attraktiv ist oder nicht«, meint Gian Francesco Giudice. »Dennoch überrascht es, dass Schönheit und Eleganz einer Theorie von Menschen aus verschiedenen Kulturen universell erkannt werden. Wenn ich Ihnen sage: ›Schauen Sie, ich habe einen neuen Artikel geschrieben, und meine Theorie ist schön‹, muss ich Ihnen keine Einzelheiten meiner Theorie nennen; Sie verstehen schon, warum ich so begeistert bin, nicht wahr?«

Ich verstehe es nicht. Deshalb unterhalte ich mich mit ihm. Warum sollte es die Naturgesetze kümmern, was ich schön finde? Eine derartige Verbindung zwischen mir und dem Universum scheint mir ziemlich mystisch, romantisch und überhaupt nicht meinem Charakter entsprechend.

Aber schließlich glaubt Gian nicht, es interessiere die Natur, was *ich* schön finde, sondern was *er* schön findet.

»Meistens ist es einfach ein gutes Gefühl«, sagt er, »nichts, was man in mathematischen Begriffen abbilden könnte: Es ist das, was man als physikalische Intuition bezeichnet. Es besteht ein wichtiger Unterschied zwischen dem, was Physiker, und dem, was Mathematiker als schön ansehen. Es ist die richtige Mischung zwischen dem Erklären empirischer Fakten und der Anwendung von Grundprinzipien, die eine physikalische Theorie erfolgreich und schön macht.«

Gian ist Leiter der Theorieabteilung am CERN, dem Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (Europäische Organisation für Kernforschung). CERN betreibt den gegenwärtig größten Teilchenbeschleuniger, den Großen Hadron-Speicherring (LHC, Large Ha-

dron Collider), der der Menschheit den bislang tiefsten Einblick in die elementaren Bausteine der Materie ermöglicht: ein 6 Milliarden Dollar teurer unterirdischer Ring zur Beschleunigung von Protonen, die man mit beinahe Lichtgeschwindigkeit aufeinanderprallen lässt.

Im LHC vereinigen sich Extreme: suprakalte Magneten, ultrahohes Vakuum und Computercluster, die während der Experimente etwa drei Gigabytes an Daten – etwa so viel wie mehrere tausend E-Books – pro Sekunde aufzeichnen. Der LHC hat tausende Wissenschaftler zusammengeführt, die in Jahrzehntelanger Forschung und mit Milliarden von Hightech-Komponenten nur ein Ziel anstreben: herauszufinden, woraus wir gemacht sind.

»Die Physik ist ein subtiles Spiel«, fährt Gian fort, »und ihre Gesetze aufzuspüren verlangt nicht nur Rationalität, sondern auch ein subjektives Urteil. Für mich ist dieser irrationale Aspekt der Grund, warum die Physik so ein Vergnügen und so aufregend ist.«

Ich telefonierte von meiner Wohnung aus mit ihm, um mich herum stapeln sich Kartons. Meine Arbeit in Stockholm ist zu Ende; es ist Zeit, weiterzuziehen und mich nach einem neuen Forschungsstipendium umzuschauen.

Als ich mein Studium abgeschlossen hatte, dachte ich, diese Wissenschaftsgemeinde sei eine Heimat, eine Familie gleichgesinnter Forscher, die versuchen, die Natur zu verstehen. Aber dann entfremdete ich mich zunehmend von Kollegen, die einerseits die Bedeutung unvoreingenommener empirischer Urteile predigen, andererseits aber ihre Lieblingstheorien anhand ästhetischer Kriterien verteidigen.

»Wenn man eine Lösung für ein Problem findet, an dem man gearbeitet hat, erlebt man eine Art innerer Erregung«, sagt Gian. »Es ist der Augenblick, in dem man plötzlich die Struktur hinter den eigenen Überlegungen erkennt.«

Gian hat sich bei seiner Forschungsarbeit auf die Entwicklung neuer Theorien der Teilchenphysik konzentriert, von denen man sich

verspricht, dass sie die Probleme vorhandener Theorien lösen. Er hat einer Methode den Weg bereitet, mit der sich quantifizieren lässt, wie natürlich eine Theorie ist; ein mathematischer Maßstab, an dem man ablesen kann, wie sehr eine Theorie von zufälligen Gegebenheiten abhängt.¹ Je natürlicher eine Theorie ist, desto weniger zufällige Gegebenheiten erfordert sie und desto überzeugender ist sie.

»Die Schönheit einer physikalischen Theorie muss etwas sein, das in unserem Gehirn fest verankert und nicht nur ein soziales Konstrukt ist. Sie ist etwas, das eine innere Saite in uns anschlägt«, meint Gian. »Auf eine schöne Theorie zu stoßen hat dieselbe emotionale Wirkung, wie vor einem Kunstwerk zu stehen.«

Nicht, dass ich nicht wüsste, wovon er spricht; ich weiß nur nicht, warum das von Bedeutung sein soll. Denn ich bezweifle, dass mein Schönheitssinn ein zuverlässiger Führer ist, wenn es darum geht, elementare Naturgesetze zu entdecken, Gesetze, die das Verhalten von Entitäten bestimmen, die ich niemals, weder jetzt noch in Zukunft, direkt sinnlich wahrnehmen kann. Wäre dieser Schönheitssinn in meinem Gehirn verankert, hätte er sich im Lauf der natürlichen Selektion als nützlich erweisen müssen. Aber welchen evolutionären Vorteil hat es jemals gehabt, die Quantengravitation zu erklären?

Auch wenn es eine hohe Kunst ist, schöne Werke zu schaffen, ist Wissenschaft nicht Kunst. Wir entwickeln keine Theorien, um emotionale Reaktionen hervorzurufen; wir suchen Erklärungen für das, was wir beobachten. Wissenschaft ist ein planvolles Unternehmen, die Mängel der menschlichen Erkenntnis zu überwinden und die Irrtümer der Intuition zu vermeiden. In der Wissenschaft geht es nicht um Emotionen – es geht um Zahlen und Gleichungen, Daten und Diagramme, Fakten und Logik.

Wahrscheinlich wollte ich von ihm einen Beweis, wie sehr ich mich irrite.

Als ich Gian frage, was er von den jüngsten LHC-Daten halte, sagt er: »Wir sind ziemlich perplex.« Endlich etwas, das ich verstehre.

Scheitern

In den ersten Jahren seines Betriebs lieferte der LHC ein Teilchen, das als Higgs-Boson bezeichnet wird und dessen Existenz bereits in den 1960er Jahren vorausgesagt wurde. Meine Kollegen und ich hegten große Hoffnungen, dass das Milliarden-Dollar-Projekt mehr bringen würde als nur die Bestätigung dessen, was niemand anzweifelte. Wir hatten einige vielversprechende Risse in den Fundamenten gefunden, die uns davon überzeugten, der LHC werde weitere, bislang unentdeckte Teilchen produzieren. Wir irrten uns. Der LHC entdeckte nichts, was unsere neuerfundenen Naturgesetze stützen würde.

Unsere Freunde in der Astrophysik schnitten nicht besser ab. In den 1930er Jahren hatten sie herausgefunden, dass Galaxienhaufen viel mehr Masse enthielten, als alle sichtbare Materie zusammengekommen ergeben würde. Selbst wenn man eine große Ungenauigkeit in den Daten zulässt, wird ein neuer Typ »Dunkler Materie« benötigt, um die Beobachtungen zu erklären. Die Zahl der Belege für die Gravitationskraft der Dunklen Materie wächst, so dass wir sicher sind, dass es sie gibt. Woraus sie besteht, ist allerdings nach wie vor ein Rätsel. Astrophysiker glauben, es handle sich um eine Spielart von Teilchen, die es hier auf unserer Erde nicht gibt und die weder Licht absorbieren noch aussenden. So erdachten sie neue Naturgesetze, unbestätigte Theorien als Leitlinien für die Konstruktion von Detektoren, die ihre Ideen auf den Prüfstand stellen sollten. Seit den 1980er Jahren jagen Dutzende Experimentierteams diesen hypothetischen Teilchen der Dunklen Materie nach. Aber sie finden keine. Die neuen Theorien sind nach wie vor unbestätigt.

Genauso trostlos sieht es in der Kosmologie aus, wo Physiker vergeblich zu verstehen suchen, warum sich das Universum mit wachsender Geschwindigkeit ausdehnt, ein Phänomen, das auf »Dunkle Energie« zurückgeführt wird. Sie können mathematisch nachweisen, dass dieses seltsame Substrat nichts anderes ist als die Energie des

leeren Raums, und doch sind sie nicht in der Lage, die Menge dieser Energie zu berechnen. Es ist einer der Risse in den Grundlagen, durch die Physiker hindurchzuspähen versuchen, doch bisher können sie nichts entdecken, was ihre neuen Theorien zur Erklärung Dunkler Energie stützt.

Unterdessen möchten unsere Kollegen von der Quantenphysik eine Theorie verbessern, die keinerlei Mängel aufweist, und zwar aufgrund der Überzeugung, dass mit mathematischen Strukturen, die nicht mit messbaren Entitäten in Einklang stehen, etwas nicht stimmen kann. Es ärgert sie, dass »niemand die Quantenmechanik versteht«, wie Richard Feynman, Niels Bohr und andere Helden der Physik des letzten Jahrhunderts beklagten. In der Grundlagenforschung zur Quantenphysik möchten die Wissenschaftler bessere Theorien erfinden, weil sie wie alle glauben, sie blickten durch den richtigen Riss. Doch leider bestätigen alle Experimente die Voraussagen der unverständlichen Theorie des letzten Jahrhunderts. Und die jüngeren Theorien? Sie sind nach wie vor nichts als ungeprüfte Spekulationen.

Auf diese letztlich fehlgeschlagenen Versuche, neue Naturgesetze zu finden, wurde enorm viel Mühe verwendet. Seit nunmehr über dreißig Jahren sind keine Fortschritte mehr in der Grundlagenphysik zu verzeichnen.

Sie möchten also wissen, was die Welt zusammenhält, wie das Universum entstand und welche Gesetze unser Dasein bestimmen? Der Antwort am nächsten kommt man, wenn man dem Pfad der Tatsachen hinunter in die Kellergewölbe der Wissenschaft folgt. Und zwar so weit, bis die Faktenlage dünn wird und die Weiterreise von Theoretikern blockiert wird, die darüber streiten, wessen Theorie schöner ist. Dann wissen Sie, dass Sie sich auf der Ebene der Grundlagen befinden.

Die Grundlagen der Physik sind diejenigen Bestandteile unserer Theorien, die, soweit wir gegenwärtig wissen, nicht mehr von etwas Einfacherem abgeleitet werden können. An diesem tiefsten Punkt finden wir heute Raum, Zeit und 25 Teilchen samt Gleichungen, die ihr Verhalten bestimmen. Gegenstand meines Forschungsbereichs sind Teilchen, die sich durch Raum und Zeit bewegen, sich gelegentlich berühren oder Zusammensetzungen bilden. Man darf sich diese Teilchen nicht als kleine Kugeln vorstellen, das sind sie nicht, und zwar wegen der Quantenmechanik (mehr dazu später). Sie gleichen eher Wolken, die jegliche Form annehmen können.

In der Grundlagenphysik beschäftigen wir uns also nur mit Teilchen, die nicht weiter zerlegt werden können und die wir deshalb »Elementarteilchen« nennen. Soweit bislang bekannt, haben sie keine eigene Struktur. Aber sie können sich zu Atomen, Molekülen und Proteinen zusammensetzen – und schaffen auf diese Weise die ungeheure Vielfalt an Strukturen, die wir um uns herum wahrnehmen. Aus diesen 25 Teilchen sind Sie, ich und alles andere gemacht.

Aber die Teilchen selbst sind gar nicht so interessant. Interessant sind die Beziehungen zwischen ihnen, die Prinzipien, die ihre Wechselwirkungen bestimmen, die Struktur der Gesetze, die das Universum entstehen ließen und unsere Existenz ermöglicht haben. In diesem Spiel beschäftigen wir uns mit den Regeln, nicht mit den Spielsteinen. Und das Wichtigste, was wir gelernt haben, ist die Tatsache, dass die Natur nach den Regeln der Mathematik spielt.

Aus Mathematik gemacht

In der Physik bestehen Theorien aus Mathematik. Wir verwenden die Mathematik nicht, weil wir all jene abschrecken wollen, die nicht mit Differentialgeometrie und gradierter Lie-Algebra vertraut sind. Wir verwenden sie, weil wir Dummköpfe sind. Die Mathematik sorgt

dafür, dass wir ehrlich bleiben, und sie verhindert, dass wir uns selbst und andere belügen. Mit Mathematik kann man Fehler machen, aber nicht lügen.

Als theoretische Physiker haben wir die Aufgabe, mathematische Methoden zu entwickeln, um damit entweder Beobachtungen zu beschreiben oder Voraussagen zu machen, die experimentelle Strategien begründen. Bei der Entwicklung von Theorien erzwingt die Mathematik logische Genauigkeit und innere Konsistenz; sie gewährleistet, dass die Theorien unzweideutig und Schlussfolgerungen reproduzierbar sind.

Der Erfolg der Mathematik in der Physik ist enorm, folglich wird dieser Qualitätsmaßstab heute rigoros umgesetzt. Die Theorien, die wir heute bilden, sind Reihen von Annahmen – mathematische Relationen oder Definitionen samt ihren Interpretationen, die die Mathematik mit beobachtbaren Dingen in der realen Welt verbinden.

Aber wir entwickeln Theorien nicht, indem wir Annahmen treffen und dann in einer Folge von Theoremen und Beweisen beobachtbare Folgerungen daraus ableiten. In der Physik beginnen Theorien meist als lose Flickwerke von Ideen. Das Chaos zu ordnen, das Physiker bei der Theorieentwicklung hervorbringen, und eine saubere Reihe von Annahmen zu erstellen, aus denen die gesamte Theorie abgeleitet werden kann, bleibt häufig unseren Kollegen in der mathematischen Physik überlassen – einem Zweig der Mathematik, nicht der Physik.

Physiker und Mathematiker haben sich größtenteils auf eine gute Arbeitsteilung geeinigt, bei der sich Erstere über die Pingeligkeit der Letzteren und diese sich über die Schlamigkeit der Ersteren beklagen. Doch beide Seiten sind sich zumindest darin einig, dass der Fortschritt auf dem einen Gebiet auch den Fortschritt auf dem anderen fördert. Von der Wahrscheinlichkeitstheorie bis zur Chaos- und zur Quantenfeldtheorie als Grundlage der modernen Teilchenphysik sind Mathematik und Physik stets Hand in Hand gegangen.

Aber Physik ist nicht Mathematik. Abgesehen davon, dass eine tragfähige Theorie in sich konsistent sein muss (also nicht zu Schlussfolgerungen führt, die einander widersprechen), muss sie auch mit der Beobachtung übereinstimmen (darf also nicht in Widerspruch zu den Daten stehen). In meinem Bereich der Physik, in dem es um die Grundfragen geht, ist dies eine strikte Forderung. Es gibt so viele Daten, dass schlichtweg nicht alle Berechnungen für neu aufgestellte Theorien durchgeführt werden können. Aber das ist auch nicht notwendig, weil es einen kürzeren Weg gibt: Zunächst wird belegt, dass eine neue Theorie im Rahmen der Messgenauigkeit mit den bestätigten alten Theorien in Einklang steht und somit deren Voraussagen reproduziert. Sodann müssen wir nur noch berechnen, was die neue Theorie darüber hinaus erklären kann.

Den Nachweis zu führen, dass eine neue Theorie alle Voraussagen tragfähiger alter Theorien reproduziert, kann äußerst schwierig sein. Das liegt daran, dass eine neue Theorie unter Umständen ein völlig anderes mathematisches Rahmenwerk benutzt, das scheinbar gar nichts mit dem der alten Theorie zu tun hat. Um zu zeigen, dass beide trotzdem zu denselben Voraussagen für bereits existierende Beobachtungen führen, ist es häufig erforderlich, die neue Theorie entsprechend umzuformulieren. In Fällen, bei denen die neue Theorie den mathematischen Rahmen der alten unmittelbar wiederverwendet, ist dies einfach. Ein völlig neues Rahmenwerk kann jedoch ein großes Hindernis darstellen.

So rang etwa Einstein jahrelang um den Beweis, dass die Allgemeine Relativitätstheorie (seine neue Gravitationstheorie) die zutreffenden Voraussagen ihrer Vorläuferin, der Newton'schen Gravitationstheorie, reproduzierte. Das Problem bestand nicht darin, dass seine Theorie falsch war, sondern darin, dass er nicht wusste, wie er Newtons Gravitationspotential aus seiner eigenen Theorie ableiten sollte. Einstein hatte mathematisch alles richtig gemacht, aber es fehlte der Nachweis für die Übereinstimmung mit der realen Welt.