

Leonard Susskind

Der Krieg um das Schwarze Loch

Wie ich mit
Stephen Hawking
um die Rettung der
Quantenmechanik
rang

Suhrkamp

SV

Leonard Susskind Der Krieg um das Schwarze Loch

Wie ich mit Stephen Hawking
um die Rettung
der Quantenmechanik rang

Aus dem Amerikanischen von
Friedrich Giese

Suhrkamp Verlag

Die amerikanische Originalausgabe erschien unter dem Titel
*The Black Hole War. My Battle with Stephen Hawking to Make
the World Safe for Quantum Mechanics* bei Little, Brown and
Company (New York/Boston/London, 2008)
Copyright © 2008 by Leonard Susskind

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Erste Auflage 2010

© der deutschen Ausgabe Suhrkamp Verlag Berlin 2010

Alle Rechte vorbehalten, insbesondere das des öffentlichen Vortrags sowie der Übertragung durch Rundfunk und Fernsehen, auch einzelner Teile. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotografie, Mikrofilm oder andere Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Druck: CPI – Ebner & Spiegel, Ulm

Printed in Germany

ISBN 978-3-518-42205-2

I 2 3 4 5 6 – 15 14 13 12 11 10

»Was bläst den Gleichungen
den Odem ein und erschafft ihnen
ein Universum,
das sie beschreiben können?«

Stephen Hawking

Inhalt

Einführung	9
----------------------	---

Teil I

Der Sturm zieht auf

1. Der erste Schuß	23
2. Der dunkle Stern.	32
3. Nicht die Geometrie Ihres Großvaters	61
4. »Einstein, schreiben Sie Gott nicht vor, was er zu tun hat«	91
5. Planck erfindet einen besseren Maßstab.	132
6. In einer Bar am Broadway	139
7. Energie und Entropie	149
8. Wheelers Jungs oder Wieviel Information man in ein Schwarzes Loch stopfen kann	168
9. Schwarzes Licht.	184

Teil II

Überraschungsangriff

10. Wie Stephen seine Bits verlor und nicht wußte, wo er sie suchen sollte.	209
11. Der Widerstand aus Holland	225
12. Wen interessiert das?	233
13. Das Patt	246
14. Scharmützel in Aspen	262

Teil III

Gegenangriff

15. Die Schlacht von Santa Barbara	271
16. Moment! Kehr die Verdrahtung um!	309
17. Ahab in Cambridge	316
18. Die Welt als Hologramm	338

Teil IV

Der Ring schließt sich

19. Masseneduktionswaffe	359
20. Alices Flugzeug oder Der letzte sichtbare Propeller	412
21. Zählung der Schwarzen Löcher	425
22. Südamerika gewinnt den Krieg	458
23. Kernphysik? Das ist nicht dein Ernst!	487
24. Demut	499
Epilog	510
Danksagung	517
Glossar	519
Register	524

Einführung

»Es gab so viel zu grokken, so wenig,
woraus man grokken konnte.«

Robert A. Heinlein, Stranger in a Strange Land

Irgendwo in der ostafrikanischen Savanne hält eine alternde Löwin Ausschau nach Futter. Sie bevorzugt ältere, langsamere Opfer, findet aber nichts anderes als die junge, gesunde Antilope. Die wachsamen Augen der Beute sitzen seitlich am Kopf, ideal, um die Umgebung nach gefährlichen Raubtieren abzusuchen. Die Augen des Raubtiers blicken direkt nach vorn, genau richtig, um das Opfer fest in den Blick zu nehmen und die Entfernung abzuschätzen.

Diesmal entgeht das Raubtier den Weitwinkelsuchern der Antilope, und sie gerät in den Angriffsbereich. Die kraftvollen Hinterbeine der Löwin treiben sie vorwärts, auf das in Panik versetzte Opfer zu. Einmal mehr beginnt dieser uralte Wettlauf.

Trotz der Bürde ihres Alters ist die Großkatze der überlegene Sprinter. Zunächst verringert sich der Abstand, doch die kraftvollen, schnell zuckenden Muskeln der Löwin leiden zunehmend unter Sauerstoffentzug. Bald setzt die angeborene Ausdauer der Antilope sich durch, und irgendwann wechselt die relative Geschwindigkeit von Katze und Opfer das Vorzeichen: Der bis dahin schmelzende Abstand wird wieder größer. Als sie diese Wende ihres Glückes spürt, ist Ihre Königliche Hoheit geschlagen. Sie schleicht zurück ins Unterholz.

* * *

Vor fünfzigtausend Jahren entdeckt ein erschöpfter Jäger einen Höhleneingang, der durch einen Felsblock versperrt ist: ein sicherer Platz, um sich auszuruhen, falls es ihm gelingt, das schwere Hindernis fortzurücken. Im Unterschied zu seinen äffischen Vorfahren steht der Jäger aufrecht. In dieser aufrechten Haltung drückt er mächtig gegen den Felsblock, aber nichts rührt sich. Um seinen Angriffswinkel zu verbessern, nimmt der Jäger mit den Füßen einen größeren Abstand zu dem Felsen ein. Als sein Körper fast waagrecht liegt, hat die angewandte Kraft eine sehr viel größere Komponente in die richtige Richtung. Der Felsblock bewegt sich.

Abstand? Geschwindigkeit? Vorzeichenwechsel? Winkel? Kraft? Komponente? Was für unglaublich komplizierte Berechnungen haben in dem ungeschulten Gehirn des Jägers stattgefunden, ganz zu schweigen von dem der Katze! Das sind Fachbegriffe, die einem normalerweise erstmals im Physikunterricht begegnen. Wo hat die Katze gelernt, nicht nur die Geschwindigkeit ihrer Beute abzuschätzen, sondern, wichtiger noch, die relative Geschwindigkeit? Hat der Jäger einen Physikkurs besucht, um den Kraftbegriff zu erlernen? Und die Trigonometrie, um die Sinusse und Kosinusse zu berechnen und daraus die Komponenten?

Die Wahrheit ist natürlich, daß alle komplexen Lebensformen über eingebaute physikalische Begriffe verfügen, die von der Evolution in ihrem Nervensystem fest verdrahtet wurden.¹ Ohne diese vorprogrammierte Physik-Software wäre ein Überleben nicht möglich. Wir alle und sogar die Tiere sind durch Mutation und natürliche Selektion zu Physikern geworden. Beim Men-

¹ Wieviel fest verdrahtet ist und wieviel in jungen Jahren erlernt wird, weiß im Grunde niemand, aber auf diesen Unterschied kommt es hier nicht an. Entscheidend ist, daß dann, wenn unser Nervensystem ausgereift ist, die Erfahrung – sei es die eigene, sei es die von der Evolution vermittelte – uns eine Menge instinktives Wissen darüber geschenkt hat, wie sich die physikalische Welt verhält. Und dieses Wissen, ob nun fest verdrahtet oder in ganz jungen Jahren erlernt, verlernt sich nur schwer.

schen konnten diese Instinkte dank der Größe des Gehirns zu Begriffen entwickelt werden, die wir auf die Ebene des Bewußtseins heben.

Verdrahten wir uns neu

Genau genommen sind wir alle *klassische*² Physiker. Kraft, Geschwindigkeit und Beschleunigung verstehen wir instinktiv. Robert Heinlein hat in dem Science-fiction-Roman *Stranger in a Strange Land* (1961) für dieses ganz intuitive, nahezu instinktive Verstehen eines Phänomens ein Wort geprägt: grokken.³ Ich grokke Kraft, Geschwindigkeit und Beschleunigung. Ich grokke den dreidimensionalen Raum. Ich grokke die Zeit und die Zahl 5 ∴. Die Flugbahnen eines Steins oder eines Speers sind grokkierbar. Mein eingebauter Normal-Grokker versagt jedoch, wenn ich versuche, ihn auf die zehndimensionale Raumzeit oder die Zahl 10^{1000} oder, schlimmer noch, auf die Welt der Elektronen und die Heisenbergsche Unschärferelation anzuwenden.

Am Beginn des 20. Jahrhunderts versagte die Intuition ganz und gar – die Physik geriet plötzlich durch ganz ungewohnte Phänomene aus den Fugen. Mein Großvater väterlicherseits war schon zehn Jahre alt, als Albert Michelson und Edward Morley entdeckten, daß sich die Bahnbewegung der Erde durch den hypothetischen Äther nicht nachweisen ließ.⁴ Das Elektron war unbekannt, bis er in seinen Zwanzigern war; er wurde dreißig in dem Jahr, in dem Einstein die Spezielle Relativitätstheorie veröffentlichte,

2 Das Wort »klassisch« bezieht sich auf eine Physik, die nicht die Erwägungen der Quantenmechanik voraussetzt.

3 *Grokken* bedeutet, etwas durch und durch und intuitiv verstehen.

4 Das berühmte Experiment von Michelson und Morley zeigte erstmals, daß die Geschwindigkeit des Lichts nicht von der Bewegung der Erde abhängt. Es führte zu den Widersprüchen, die Einstein schließlich in der Speziellen Relativitätstheorie auflöste.

und er war bereits in gereiftem Alter, als Heisenberg die Unschärferelation entdeckte. Der Evolutionsdruck hätte uns in keiner Weise ein instinktives Verständnis dieser radikal anderen Welten entwickeln lassen können. Aber etwas in unseren neuronalen Netzen war – zumindest bei einigen von uns – auf eine phantastische Neuverdrahtung vorbereitet, dank derer wir nicht nur nach diesen obskuren Phänomenen fragen, sondern außerdem mathematische Abstraktionen – gänzlich unintuitive Konzepte – bilden können, um mit ihnen umzugehen und sie zu erklären.

Die Notwendigkeit einer Neuverdrahtung entstand erstmals durch die Geschwindigkeit, eine Geschwindigkeit, die so hoch war, daß sie es fast mit der Geschwindigkeit eines flüchtigen Lichtstrahls aufnehmen konnte. Vor dem 20. Jahrhundert hat kein Tier sich jemals schneller als mit 160 Kilometern pro Stunde fortbewegt, und auch heute noch pflanzt Licht sich so schnell fort, daß es sich außer für wissenschaftliche Zwecke überhaupt nicht fortpflanzt – es ist einfach sofort da, sobald wir die Lampe anmachen. Die ersten Menschen hatten keinen Bedarf für festverdrahtete Schaltungen, die auf ultraschnelle Geschwindigkeiten wie die Lichtgeschwindigkeit eingestellt waren.

Die Neuverdrahtung wegen der Geschwindigkeit vollzog sich plötzlich. Einstein war kein Mutant; er hatte unbemerkt zehn Jahre lang darum gerungen, seine alte Newtonsche Verdrahtung loszuwerden. Aber den Physikern von damals muß es so vorgekommen sein, als sei spontan eine neue Art von Mensch unter ihnen erschienen, jemand, der die Welt nicht unter dem Aspekt des dreidimensionalen Raums sah, sondern unter dem Aspekt der vierdimensionalen *Raumzeit*.

Einstein kämpfte nochmals zehn Jahre lang – nunmehr ganz im Blickfeld der Physiker – darum, das, was er Spezielle Relativitätstheorie genannt hatte, mit Newtons Gravitationstheorie zu vereinen. Was dabei herauskam – die Allgemeine Relativitätstheorie – veränderte grundlegend alle herkömmlichen Vorstellungen von der Geometrie. Die Raumzeit wurde flexibel, gekrümmt oder

verzerrt. Sie reagierte auf das Vorhandensein von Materie fast wie ein Gummiband unter Belastung. Bis dahin war die Raumzeit passiv gewesen, mit starren geometrischen Eigenschaften. In der Allgemeinen Relativitätstheorie wurde die Raumzeit zu einem aktiven Spieler; sie konnte durch massereiche Objekte wie Planeten oder Sterne deformiert werden, aber man konnte sie nicht visualisieren, jedenfalls nicht ohne eine Menge zusätzlicher Mathematik.

Im Jahr 1900, fünf Jahre bevor Einstein die Szene betrat, war mit der Entdeckung, daß Licht aus Teilchen besteht, die man Photonen oder gelegentlich auch Lichtquanten nannte, ein noch seltsamerer Paradigmenwechsel in Gang gekommen.⁵ Die Photonentheorie des Lichts war nur eine Andeutung der kommenden Revolution, die eine derart abstrakte Hirnacrobatik erforderte, wie man sie noch nicht erlebt hatte. Die Quantenmechanik war mehr als ein neues Naturgesetz. Sie veränderte die Regeln der klassischen Logik, die normalen Denkregele, die jeder geistig gesunde Mensch benutzt, um Ableitungen zu machen. Sie erschien verrückt. Aber mochte sie auch verrückt sein – die Physiker konnten sich mittels einer neuen Logik, die man Quantenlogik nannte, neu verdrahten. Im vierten Kapitel werde ich alles erklären, was Sie über die Quantenmechanik wissen müssen. Machen Sie sich darauf gefaßt, daß sie Sie verwirren wird. Sie verwirrt jeden.

Relativitätstheorie und Quantenmechanik wollten anfangs nichts voneinander wissen. Als man sie dann in eine Muß-Ehe zwang, brach sofort Gewalt aus – auf jede Frage, die ein Physiker stellen konnte, antworteten die Gleichungen mit rasenden Unendlichkeiten. Ein halbes Jahrhundert dauerte es, bis Quantenmechanik und Spezielle Relativitätstheorie sich miteinander aussöhnten, aber schließlich wurden die mathematischen Ungeheimheiten beseitigt. Anfang der fünfziger Jahre des vorigen Jahr-

5 Der Ausdruck *Photon* kam erst seit 1926 in Gebrauch, als der Chemiker Gilbert Lewis ihn prägte.

hunderts hatten Richard Feynman, Julian Schwinger, Sin-Itiro Tomanaga und Freeman Dyson⁶ die Grundlagen für eine Synthese der *Speziellen* Relativitätstheorie und der Quantenmechanik in Gestalt der Quantenfeldtheorie geschaffen. Die *Allgemeine* Relativitätstheorie (Einstein's Synthese der Speziellen Relativitätstheorie und der Newtonschen Gravitationstheorie) und die Quantenmechanik waren aber nach wie vor nicht unter einen Hut zu bringen, obwohl es genügend Versuche gab. Feynman, Steven Weinberg, Bryce DeWitt und John Wheeler hatten sich bemüht, Einstein's Gravitationsgleichungen zu »quantisieren«, aber dabei war nur mathematischer Unsinn herausgekommen. Das war wohl nicht verwunderlich. Die Quantenmechanik galt für die Welt sehr leichter Objekte. Die Gravitationstheorie schien dagegen nur für sehr schwere Materiebrocken zu gelten. Man konnte getrost davon ausgehen, daß nichts, was leicht genug war, um für die Quantenmechanik interessant zu sein, gleichzeitig schwer genug war, um für die Gravitationstheorie in Frage zu kommen. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts waren viele Physiker daher der Meinung, die Suche nach einer solchen vereinheitlichenden Theorie sei sinnlos und nur etwas für Spinner und Philosophen.

Andere jedoch hielten das für kurzsichtig. Daß zwei Theorien der Natur unvereinbar nebeneinanderstehen oder sich gar widersprechen sollen, empfanden sie als geistige Zumutung. Bei der Festlegung der Eigenschaften der kleinsten Bausteine der Materie hatte die Gravitation ihrer Meinung nach nahezu sicher eine Rolle gespielt. Das Problem war, daß die Physiker nicht gründlich genug nachgeforscht hatten. Und tatsächlich behielten sie recht: Ganz unten im Fundament der Welt, wo die Entfernungen viel zu klein sind, um sie direkt beobachten zu können, üben die kleinsten Objekte der Natur starke Gravitationskräfte aufeinander aus.

⁶ Feynman, Schwinger und Tomanaga wurden 1965 für ihre Arbeit mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Die moderne Auffassung der Quantenfeldtheorie verdankt Dyson jedoch ebensoviel wie den anderen.

Heute nimmt man weithin an, daß die Gravitation und die Quantenmechanik in gleichem Maß die Gesetze der Elementarteilchen bestimmen. Die elementaren Bausteine der Natur sind allerdings so unvorstellbar klein, daß wir uns nicht wundern müßten, wenn wir sie nur durch eine umfassende Neuverdrahtung verstehen könnten. Die neue Verdrahtung wird man, gleichgültig, wie sie beschaffen sein wird, *Quantengravitation* nennen. Ohne sie im einzelnen zu kennen, können wir getrost sagen, daß das neue Paradigma sehr ungewohnte Vorstellungen von Raum und Zeit enthalten wird. Um die objektive Realität von Punkten im Raum und Momenten in der Zeit ist es schlecht bestellt – sie wird dasselbe Schicksal erleiden wie die Gleichzeitigkeit,⁷ der Determinismus⁸ und der Dodo (auch Dronte genannt). Die Quantengravitation beschreibt eine Realität, die weit subjektiver ist, als wir es uns jemals vorgestellt haben. Es ist, wie wir in Kapitel 18 sehen werden, eine Realität, die in vielerlei Hinsicht an die geisterhafte dreidimensionale Illusion erinnert, die ein Hologramm erzeugt.

Theoretische Physiker bemühen sich, in einem unbekannten Land Fuß zu fassen. Wie schon in der Vergangenheit haben Gedankenexperimente Widersprüche und Konflikte zwischen fundamentalen Prinzipien zutage gefördert. Dieses Buch handelt von einem geistigen Kampf um ein einziges Gedankenexperiment. Stephen Hawking stellte sich 1976 vor, ein Stück Information – ein Buch, einen Computer oder auch nur ein Elementarteilchen – in ein Schwarzes Loch zu werfen. Schwarze Löcher, meinte Hawking, seien ultimative Fallen und das Stück Information sei für die Außenwelt unwiederbringlich verloren. Seine scheinbar harmlose Bemerkung war keineswegs so harmlos,

7 Zu den ersten Dingen, die 1905 mit der Revolution der Relativitätstheorie verschwanden, gehörte die Vorstellung, daß zwei Ereignisse objektiv gleichzeitig stattfinden können.

8 Determinismus ist das Prinzip, daß die Zukunft vollständig durch die Vergangenheit determiniert ist.

wie sie klingt; sie drohte, das ganze Gebäude der modernen Physik zu untergraben und ins Wanken zu bringen. Etwas war völlig aus dem Gleichgewicht geraten – das elementarste Naturgesetz, die Erhaltung der Information, war ernstlich gefährdet. Für diejenigen, die aufmerksam zuhörten, war klar: Entweder irrte Hawking, oder der dreihundert Jahre alte Kernsatz der Physik galt nicht mehr.

Zunächst blieb die Sache fast unbeachtet. Fast zwei Jahrzehnte lang spielte die Kontroverse sich weitgehend unbemerkt ab. Der bedeutende niederländische Physiker Gerard 't Hooft und ich bildeten eine Zwei-Mann-Armee auf der einen Seite der geistigen Scheidelinie. Stephen Hawking und eine kleine Armee von Relativisten standen auf der Gegenseite. Erst Anfang der neunziger Jahre erkannten die meisten theoretischen Physiker – speziell Stringtheoretiker – die Bedrohung, die Hawking aufgeworfen hatte, um sie dann überwiegend falsch zu verstehen, zumindest eine Zeitlang.

Der Krieg um das Schwarze Loch war eine echte wissenschaftliche Kontroverse, nicht zu vergleichen mit den Pseudodebatten über Intelligent Design oder die Frage, ob es eine globale Erwärmung gibt. In diesen vorgetäuschten Auseinandersetzungen, die von politischen Manipulatoren ersonnen wurden, um eine ahnungslose Öffentlichkeit zu verwirren, ging es nicht um reale wissenschaftliche Meinungsverschiedenheiten. Der Streit um die Schwarzen Löcher dagegen war sehr real. Bedeutende theoretische Physiker konnten sich nicht darüber einigen, welchen Prinzipien der Physik sie noch trauen und welche sie aufgeben sollten. Wem wollten sie folgen: Hawking mit seinen konservativen Ansichten über die Raumzeit oder 't Hooft und mir mit unseren konservativen Ansichten über die Quantenmechanik? Jeder Standpunkt schien nur zu Paradoxien und Widersprüchen zu führen. Entweder konnte die Raumzeit – die Bühne, auf der die Naturgesetze agieren – nicht das sein, wofür wir sie hielten, oder die altherwürdigen Prinzipien der Entropie und der Information

waren falsch. Jahrmillionen der kognitiven Evolution und einige Jahrhunderte der physikalischen Erfahrung hatten uns wieder einmal genarrt, und wir stellten fest, daß wir eine neue mentale Verdrahtung brauchen.

Der Krieg um das Schwarze Loch ist eine Feier des menschlichen Geistes und seiner bemerkenswerten Fähigkeit, die Gesetze der Natur zu entdecken. In dem Buch wird eine Welt erklärt, die unseren Sinnen bei weitem verschlossener ist als die Quantenmechanik und die Relativitätstheorie. Die Quantengravitation handelt von Objekten, die hundert Milliarden Milliarden mal kleiner sind als ein Proton. Nie sind wir derart kleinen Dingen begegnet, und wahrscheinlich werden wir ihnen auch nie begegnen, doch dank des menschlichen Scharfsinns konnten wir ihre Existenz herleiten, und die Tore zu jener Welt sind überraschenderweise Objekte von gewaltiger Masse und Größe: Schwarze Löcher.

Der Krieg um das Schwarze Loch ist zugleich die Chronik einer Entdeckung. Das Holografische Prinzip gehört zu den unintuitivsten Abstraktionen der gesamten Physik. Es war der Gipfel einer über zwei Jahrzehnte währenden geistigen Auseinandersetzung um das Schicksal der Information, die in ein Schwarzes Loch fällt. Es war kein Krieg zwischen erbitterten Feinden – die Hauptbeteiligten sind allesamt miteinander befreundet. Sondern es war ein scharfer intellektueller Kampf der Ideen zwischen Leuten, die einander zutiefst respektierten, zugleich aber grundverschiedener Auffassung waren.

An diesem Punkt muß ich einer verbreiteten Ansicht widersprechen. Physiker, besonders theoretische Physiker, gelten vielfach als bornierte Sonderlinge mit fremdartigen, abseitigen und langweiligen Neigungen. Nichts könnte weiter von der Wahrheit entfernt sein. Ich kenne eine ganze Reihe bedeutender Physiker, und sie sind ausgesprochen charismatische Menschen mit starken Leidenschaften und faszinierenden Ideen. Ich finde es höchst interessant, wie verschieden ihre Persönlichkeiten und ihre Denkweisen sind. Wenn ich für ein breites Publikum über

Physik schreibe und dabei das menschliche Element außen vor ließe, würde für meinen Geschmack etwas Wesentliches fehlen. Ich habe mich daher bemüht, in diesem Buch neben dem wissenschaftlichen auch den emotionalen Aspekt einzufangen.

Eine Anmerkung über große und kleine Zahlen

Sie werden in diesem Buch allenthalben auf sehr große und sehr kleine Zahlen stoßen. Das menschliche Gehirn ist nicht dafür geschaffen, sich Zahlen vorzustellen, die viel größer als 100 oder viel kleiner als $1/100$ sind, aber wir können lernen, mehr zu leisten. Ich zum Beispiel kann mir, an den Umgang mit Zahlen gewöhnt, unter einer Million ungefähr etwas vorstellen, aber der Unterschied zwischen einer Billion und einer Billiarde übersteigt mein Vorstellungsvermögen. Viele der Zahlen in diesem Buch gehen weit über Billionen und Billiarden hinaus. Wie behält man da den Überblick? Die Lösung liegt in einer der großartigsten Neuverdrahtungsleistungen aller Zeiten: der Erfindung von *Exponenten* und der *wissenschaftlichen Schreibweise*.

Nehmen wir zunächst eine ziemlich große Zahl. Die Erdbevölkerung beträgt rund 6 Milliarden. Eine Milliarde ist 10, neunmal mit sich selbst multipliziert. Sie läßt sich auch ausdrücken durch eine 1, gefolgt von neun Nullen.

$$\begin{aligned}\text{Eine Milliarde} &= 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \\ &= 1.000.000.000\end{aligned}$$

Eine abgekürzte Schreibweise für 10, neunmal mit sich selbst multipliziert, ist 10^9 oder *zehn hoch neun*. Die Erdbevölkerung wird also grob ausgedrückt durch diese Gleichung:

$$6 \text{ Milliarden} = 6 \times 10^9$$

In diesem Fall nennt man 9 den Exponenten.

Hier eine weit größere Zahl: die Gesamtzahl der Protonen und Neutronen in der Erde.

$$\begin{aligned} \text{Zahl der Protonen und Neutronen in der Erde (angenähert)} \\ = 5 \times 10^{51} \end{aligned}$$

Diese Zahl ist offensichtlich sehr viel größer als die Zahl der Menschen auf der Erde. Wieviel größer? Zehn hoch einundfünfzig hat 51 Zehnerfaktoren, 1 Milliarde aber nur 9. 10^{51} hat also 42 mehr Zehnerfaktoren als 10^9 . Die Zahl der Kernteilchen in der Erde ist somit rund 10^{42} mal größer als die Zahl der Menschen. (Man beachte, dass ich die Multiplikatoren 5 und 6 in den vorstehenden Gleichungen übergangen habe. Da 5 und 6 nicht stark voneinander abweichen, kann man sie übergehen, wenn man nur eine grobe »Abschätzung der Größenordnung« braucht.)

Jetzt zu zwei wirklich großen Zahlen. Die Gesamtzahl der Elektronen in dem Teil des Universums, den wir mit den stärksten Teleskopen beobachten können, beträgt ungefähr 10^{80} . Die Gesamtzahl der Photonen⁹ beträgt etwa 10^{90} . Nun mag 10^{90} nicht so viel größer als 10^{80} erscheinen, aber das täuscht: 10^{90} ist 10^{10} mal größer, und 10.000.000.000 ist eine wirklich große Zahl. Eigentlich scheinen 10^{80} und 10^{81} ja fast gleich zu sein, aber die zweite Zahl ist zehnmal größer als die erste. Eine geringfügige Änderung des Exponenten kann also eine gewaltige Änderung der dargestellten Zahl zur Folge haben.

Kommen wir nun zu den sehr kleinen Zahlen. Die Größe eines Atoms beträgt etwa ein Zehnmilliardstel eines Meters. In Dezimalschreibweise

$$\text{Größe eines Atoms} = 0,0000000001 \text{ Meter}$$

⁹ Verwechseln Sie Photonen nicht mit Protonen. *Photonen* sind Lichtteilchen. *Protonen* bilden zusammen mit den Neutronen den Atomkern.