

HARRY CLIFF

**WAS MACHT
DAS QUARK IM
APFELKUCHEN?**



**Vom
Big Bang
zum Higgs-
Boson**

**Auf der Suche nach dem Rezept
für unser Universum**

dtv

Harry Cliff

Was macht das Quark im Apfelkuchen?

*Auf der Suche nach dem Rezept für unser
Universum*

Aus dem Englischen von Jörn Pinnow

dtv

Für Vicky und Robert, danke.

Möchte man aus dem Nichts einen Apfelkuchen
machen,

muss man erst das Universum erfinden.

Carl Sagan

Vorwort

An einem frostigen Morgen im März 2010 steuerte ich meinen Wagen auf ein umzäuntes Gelände in den Außenbezirken der französischen Gemeinde Ferney-Voltaire. Ein an das stählerne Eingangstor geschraubtes Schild verkündete:

CERN SITE 8
ACCÈS RÉSERVÉ AUX PERSONNES AUTORISÉES
(ZUTRITT NUR FÜR BEFUGTE)

Ungeschickt lehnte ich mich über den Beifahrersitz meines Rechtslenkers hinweg aus dem Fenster und zog meinen Sicherheitsausweis über das Lesegerät. Das Tor öffnete sich nicht. Hmmm ... hatte ich die Sicherheitsüberprüfung nicht bestanden? Hinter mir bildete sich bereits eine Autoschlange, weshalb ich zunehmend hektisch wieder und wieder meine Karte über den Scanner zog. Nichts. Gerade wollte ich aussteigen, um in meinem ungelassenen Schulfranzösisch mit dem Wachpersonal zu verhandeln, als sich zu meiner großen Erleichterung knirschend das Tor öffnete.

Ich parkte hinter der großen Versuchshalle mit Blick auf den Maschendrahtzaun, der das Gelände von der Startbahn des Genfer Flughafens trennt. Als ich ausstieg, bildete mein

Atem in der kalten Luft Wölkchen, und ich nahm den seltsam süßlichen Geruch der Parfumfabrik war, der aus dem nahe gelegenen Schweizer Meyrin herüberzog. Die Hände tief in die Jackentaschen gebohrt, machte ich mich auf zum Gebäude 3894 – hinter diesem prosaischen Namen verbirgt sich ein einstöckiger Stahlcontainer für die frühmorgendlichen Meetings.

Im Innern saßen bereits die meisten Teilnehmer dicht gedrängt um den langen Tisch. Einige plauderten mit ihren Nachbarn auf Englisch, Französisch, Deutsch oder Italienisch; andere nippten an einem Kaffee oder beugten sich über ihren Laptop. Ich fand einen Platz in der zweiten Stuhlreihe hinter dem Tisch und hoffte, dass mich hier niemand ansprechen würde.

Rund hundert Meter unter unseren Füßen befand sich ein ringförmiger Betontunnel, so lang, dass er um eine ganze Stadt herumreichen würde. In ihm erwachte gerade die größte und mächtigste Maschine zum Leben, die je gebaut wurde: der Large Hadron Collider (LHC, Großer Hadronen-Speicherring). In wenigen Tagen wollten Forscher in dem Teilchenbeschleuniger subatomare Teilchen mit derartiger Wucht aufeinanderschießen, dass sich für einen kurzen Augenblick Zustände ergeben, wie sie unmittelbar nach dem Urknall geherrscht haben.

Diese winzigen, aber katastrophalen Zusammenstöße würden dabei von vier riesigen Teilchendetektoren aufgezeichnet werden: Auf dem LHC-Ring mit einigen Kilometern Abstand verteilt, stehen diese gewaltigen Maschinen in unterirdischen Höhlen, in die problemlos ganze Kirchen passen würden. Einer dieser Detektoren

befand sich direkt unter uns – er trägt den Namen »Large Hadron Collider beauty Experiment« (LHCb) – 6000 Tonnen Stahl, Aluminium, Silizium und Glasfaserkabel, wie ein Sprinter im Starterblock eingerastet, bereit für den Einsatz.

Und er hatte lange auf seinen Augenblick gewartet. Einige meiner Kollegen hatten ihr gesamtes Arbeitsleben damit verbracht, diesen Moment Wirklichkeit werden zu lassen. Zwanzig Jahre Planung, Finanzierungsverhandlungen, minutiöses Entwerfen, Testen und Konstruieren hatten zu einem der technisch fortschrittlichsten Teilchendetektoren geführt, die je gebaut worden waren. In den kommenden Tagen sollte das Ergebnis all dieser Bemühungen endlich einer Probe unterzogen werden, wenn die Ingenieure des LHC zum ersten Mal Teilchen im Ring beschleunigen und innerhalb des Detektors zur Kollision bringen wollten.

Wenige Wochen zuvor war ich als 24-jähriger Doktorand im zweiten Jahr nach Genf gekommen, um den ersten von zwei dreimonatigen Arbeitsaufenthalten zu beginnen. Mein neues Zuhause war das CERN, die Europäische Organisation für Kernforschung, mit dem größten und fortschrittlichsten Teilchenlabor der Welt. Inzwischen fand ich mich immer besser in diesem Labyrinth aus Bürogebäuden, Werkstätten und Laboren zurecht, die auf dem weitläufigen CERN-Gelände verteilt waren. Ich hatte gegen Februar-Schneestürme angekämpft und erfahren müssen, dass man in der Schweiz eine Standpauke vom Nachbarn riskiert, wenn man nach 22 Uhr noch die Toilettenspülung benutzt. Auch mit meinen neuen Aufgaben

beim LHCb war ich inzwischen recht gut vertraut – ich trug die Verantwortung für eines der Subsysteme, die alle einwandfrei würden funktionieren müssen. Sollte auch nur eines versagen, könnten sich die so lang erwarteten Daten als unbrauchbar erweisen.

Eineinhalb Jahre zuvor hatte ich den LHCb zum ersten Mal mit eigenen Augen gesehen. Mein Betreuer Uli, ein deutscher Postdoc-Forscher, der Vollzeit am CERN arbeitete, hatte mir durch die komplizierte Prozedur geholfen, ohne die man dem Detektor nicht nahe kommen kann. Nachdem ich einen Badge an meiner Kleidung befestigt hatte, der die Strahlung maß, der ich während meines Aufenthalts unter Tage ausgesetzt war, musste ich einen eher launischen Iris-Scanner davon überzeugen, mich eine Reihe leuchtend grüner, als Luftschleusen konstruierter Türen passieren zu lassen. Dann schaukelte mich ein kleiner Metallfahrstuhl die 105 Meter hinunter in den »pit«, die »Grube«, wie die etwas bedrohliche, hier allgemein gebräuchliche Bezeichnung lautet.

Hinter den Aufzugtüren öffnete sich eine seltsame unterirdische Welt voll surrender Maschinen mit in den Primärfarben bemalten Metallgerüsten und dem Betontunnel, durch den kilometerlange Kabel und Röhren führten. Noch eine Reihe Sicherheitstüren, dieses Mal leuchtend gelb und beklebt mit Warnhinweisen zu gefährlicher Strahlung, dann ein enger Durchgang durch eine 12 Meter dicke Schutzmauer, und mit einem Mal standen wir in einer enormen Betonkaverne.

Das Erste, was einen beeindruckt, ist die schiere Größe. Der LHCb ist gewaltig: 10 Meter hoch und 21 Meter lang,

womit er die gesamte Breite der Kaverne ausfüllt. Auf den ersten Blick versteht man kaum, was man da vor sich hat. Die Sicht wird durch grün und gelb gestrichene Treppen, Stahlplattformen und Gerüste versperrt, die zum einen die Anlage stützen, zum anderen den Zugang zu wichtigen Bauteilen des Detektors ermöglichen. Freien Blick hat man allerdings auf fast keines von ihnen. Über die Wände des Tunnels verlaufen im Zickzack Kabel, die entweder dem Detektor Strom zuführen oder die Sturzflut an Daten abtransportieren, die von Millionen winziger, ungemein präzise konstruierter Sensoren erzeugt werden. Der LHCb kann für Tausende subatomarer Teilchen zugleich aufzeichnen, welche Wege sie nach den Kollisionen haarscharf unter Lichtgeschwindigkeit nehmen, mit einer Genauigkeit von wenigen Tausendsteln eines Millimeters. Und das in Intervallen von Millionen Bruchteilen einer Sekunde.

Doch das Bemerkenswerteste am LHCb ist die Art und Weise, wie er errichtet wurde. Wie alle vier großen LHC-Detektoren an dem Ring entstand er durch eine Kooperation, die einem modernen Babel glich: Jede Komponente wurde in einem internationalen Zusammenspiel von Physikern und Ingenieuren an Dutzenden Universitäten rund um die Erde entwickelt und konstruiert, von Rio de Janeiro bis nach Nowosibirsk. Dann wurden die Teile in das riesige Loch im Boden unter Genf geliefert, um zu einem einzigen, unglaublich komplexen Instrument zusammengesetzt zu werden. Die Tatsache, dass diese vier Riesen überhaupt laufen, wirkt für mich noch heute wie ein Wunder.

Meine Kollegen in Cambridge hatten die letzten zehn Jahre damit verbracht, die Elektronik zu entwerfen, zu bauen und zu testen, mit der die Daten dieses Subdetektoren verarbeitet werden, dessen Aufgabe es ist, die unterschiedlichen Teilchenarten bei der Kollision auseinanderzuhalten. Mein Job wiederum bei all dem war, sicherzustellen, dass die Software zur Überwachung dieser Elektronik ihren Dienst ohne Absturz oder sonstige Fehler tut, sobald die Maschine läuft. Zwar war ich nur ein kleines Rädchen in dieser gigantischen Maschinerie, doch war ich mir sehr bewusst, dass zwanzig Jahre Anstrengung von Hunderten Physikern aus siebzig Ländern und 65 Millionen Euro Investitionen aus mehr als einem Dutzend nationaler Finanzierungstöpfe auch davon abhingen, dass ich meinen Job gut erledigte. Ich wollte nicht derjenige sein, der in letzter Minute alles ruinierte.

Das Geplauder im Konferenzraum verstummte abrupt, als der Projektleiter des ersten Rundlaufs die Sitzung eröffnete. Ich sah mich nach meinen Kolleginnen und Kollegen um. Viele von ihnen sahen aus, als hätten sie in den letzten Tagen nicht viel Schlaf bekommen. Mir war klar, dass nun die wichtigsten Tage in meiner bisherigen Karriere vor mir lagen. Das Meeting begann mit einem Bericht über die Arbeiten, die über Nacht am LHC stattgefunden hatten, den die Menschen am CERN schlicht als »die Maschine« bezeichnen. Und auf diese Maschine warteten wir nun alle.

Nach drei Jahrzehnten Arbeit ist der LHC ein Wissenschaftsprojekt, wie es zuvor keines gegeben hat. Fast alles an ihm ist extrem. Er ist das größte je gebaute

Messinstrument, in gewisser Weise die größte je gebaute Maschine überhaupt: Er misst 27 Kilometer im Umfang, weshalb der Ring die Grenze zwischen Frankreich und der Schweiz vier Mal unterquert (man hat an diesen Stellen im Tunnel sogar die entsprechenden Flaggen an die Wände gemalt). Die Strahlrohre, in denen die Teilchen umhersausen, sind leerer als der interstellare Raum, und die Tausenden von supraleitenden Magneten, die die Teilchen um den Ring lenken, arbeiten bei einer atemberaubend niedrigen Temperatur von $-271,3$ Grad Celsius, weniger als 2 Grad über dem absoluten Nullpunkt. Um das zu erreichen, braucht man die weltgrößte Tieftemperaturanlage: Sie benötigt mehr als 10000 Tonnen flüssigen Stickstoff und so viel Elektrizität wie eine Großstadt, um 120 Tonnen supraflüssiges Helium^[1] zu erzeugen. Dieses wird dann intravenös durch die Magnete des LHC gepumpt. Ein paar Tage nach unserem morgendlichen Meeting sollte diese gewaltige Maschine subatomare Teilchen, sogenannte Protonen, auf 99,999996 Prozent der Lichtgeschwindigkeit beschleunigen, um sie dann schnurstracks an vier Stellen des Rings, darunter der LHCb, zusammenkrachen zu lassen. So sollten Formen von Materie entstehen, die in so großen Mengen seit einer Billionstelsekunde nach dem Beginn des Universums nicht mehr vorkamen.

All dies, die vielen Jahre Entwicklungsarbeit und Finanzierungsbemühungen, die Mobilisierung einer globalen Gemeinschaft von Tausenden Physikern, die Bauingenieurleistung (zu der das Graben durch einen unterirdischen Fluss gehörte, der zuvor mit flüssigem

Stickstoff eingefroren worden war), ganz zu schweigen von der Herstellung, dem Testen und der Installation von Millionen Einzelteilen, vom 35 Tonnen schweren Magneten bis zum kleinsten Siliziumsensor, all dies dient nur einem einzigen Zweck: der Befriedigung unserer Neugier. Ganz gleich, was Ihnen die Boulevardpresse einreden möchte – etwa der britische *Daily Express*, der unaufhörlich suggeriert, das CERN würde den LHC für ruchlose Zwecke einsetzen. Soll hier das Portal in eine weitere, »unheimliche« Dimension^[2] geöffnet werden (womöglich war das Tor zur »anderen Seite« aus *Stranger Things* also in Wirklichkeit ein Fehler des CERN)? Oder dient der LHC dazu, mein Lieblingszitat, »Gott herbeizurufen«^[3]?

Tatsächlich wurde der LHC allein dazu gebaut, um fundamentale Fragen über die grundlegenden Bausteine unserer Welt beantworten zu können sowie der Frage auf den Grund zu gehen, wie es dazu kam, dass unser Universum existiert.

Und es gibt einige wirklich große Fragen, auf die wir Antworten suchen. Die derzeit gültige Theorie darüber, woraus die Welt auf dem untersten Level besteht, ist als »Standardmodell« der Teilchenphysik bekannt – ein enttäuschend langweiliger Name für eine der größten intellektuellen Leistungen der Menschheit. In Jahrzehnten gemeinsamer Anstrengung von Tausenden Theoretikern und Experimentalphysikern entwickelt, erklärt uns das Standardmodell, dass alles, was wir um uns herum sehen – Galaxien, Sterne, Planeten und Menschen –, aus ein paar wenigen unterschiedlichen Teilchen besteht, die innerhalb von Atomen und Molekülen durch einige wenige

elementare Kräfte zusammengehalten werden. Das Standardmodell ist eine Theorie, die alles erklärt, etwa warum die Sonne scheint und warum Dinge eine Masse haben. Außerdem hat sie bisher jede experimentelle Überprüfung bestanden, der wir sie im letzten halben Jahrhundert unterzogen haben. Ohne Zweifel: Das Standardmodell ist die erfolgreichste wissenschaftliche Theorie, die je zu Papier gebracht wurde.

Mit diesem Wissen im Hinterkopf muss nun gesagt werden, dass das Standardmodell falsch ist – oder zumindest in erheblichem Maße unvollständig. Wenn es um die tiefsten Geheimnisse geht, vor denen die heutige Physik steht, kann diese Theorie nur mit den Schultern zucken oder einen Haufen Widersprüche anbieten anstelle von Antworten. Folgendes Beispiel soll genügen: Nach jahrzehntelangem Starren in den Himmel sind sich Astrophysiker und Kosmologen inzwischen recht sicher, dass 95 Prozent des Universums aus zwei unsichtbaren Substanzen bestehen, die »Dunkle Energie« und »Dunkle Materie« heißen. Aus was auch immer sie bestehen – und wir haben in beiden Fällen noch nicht die leiseste Ahnung –, keinesfalls sind es die Teilchen aus dem Standardmodell. Und als wäre diese 95-prozentige Lücke an sich nicht schon schlimm genug, so vertritt das Standardmodell zudem noch die eher verwirrende Ansicht, dass alle existierende Materie eigentlich innerhalb der ersten Mikrosekunden nach dem Urknall in einem katastrophalen Kollaps durch Antimaterie hätte ausgelöscht werden müssen – zurückgeblieben wäre ein Universum ohne Sterne, ohne Planeten, ohne uns.

Es ist daher ziemlich unzweifelhaft, dass wir bei unserer Theorie bis dato irgendetwas übersehen haben, vermutlich in Form bislang unentdeckter Elementarteilchen, die uns erklären könnten, warum das Universum so ist, wie es ist.

Hier kommt der Large Hadron Collider ins Spiel. Als wir an jenem Morgen im März 2010 um den Konferenztisch herumsaßen, herrschte riesige Zuversicht: Wir würden schon bald etwas ganz und gar Neues oder Unerwartetes beobachten können, das sich aus den im LHC herbeigeführten Kollisionen ergeben würde. Sollte es dazu kommen, wäre dies der Beginn eines Prozesses, der einige der größten Rätsel der Wissenschaft würde lösen können.

Als ich mich Anfang 2008 für meine Promotion einschrieb, war mir bewusst, dass meine Anfänge in Teilchenphysik damit zusammenfielen, dass der LHC zum ersten Mal eingeschaltet wurde. Ich war von der Vorstellung fasziniert, einer der allerersten Studenten zu sein, die Daten von einer Maschine zu sehen bekommen würden, die seit den späten 1970ern entwickelt worden war und mehr als 12 Milliarden Euro^[4] gekostet hat. Am 10. September 2008, nur wenige Tage bevor ich mein neues Labor im englischen Cambridge bezog, wurde der LHC unter großer Anteilnahme der Medien eröffnet. In Gegenwart von Fernsehteams und Fotografen jagte man zum ersten Mal Protonen durch den 27 Kilometer langen Ring. Champagnerflaschen wurden geköpft, als Physiker und Ingenieure eine der größten wissenschaftlichen Leistungen der Geschichte feierten; und die Elementarteilchenphysik schaffte es kurz in die Nachrichten.

Weniger Tage später war der LHC aus einem anderen Grund wieder Gesprächsthema. Gegen Mittag des 19. September – man führte gerade letzte Tests an den Elektromagneten des Kollidierers durch – kam es zur Katastrophe. Ingenieure des LHC-Kontrollzentrums – im CERN das, was bei der NASA die Mission Control ist – mussten ungläubig mitansehen, wie in dem großen Raum ein Monitor nach dem anderen grellrot aufleuchtete. Ein Ingenieur, mit dem ich später darüber sprach, erzählte mir, dass anfangs so viele Alarmlöser losgingen, dass sie glaubten, es sei etwas mit der Software nicht in Ordnung, die den Beschleuniger überwachte. Stunden später, als man endlich in den Tunnel hinunterkonnte, erkannten er und seine Kollegen das wahre Ausmaß der Verwüstung.

Eine einzige lose Verbindung hatte einen elektrischen Defekt verursacht. Daraufhin war es zu einer physikalischen Explosion gekommen, die das zur Kühlung der Magneten eingesetzte flüssige Helium erreichte und eine Schockwelle erzeugte, die auf einer Strecke von 750 Metern entlang des Beschleunigerrings [\[5\]](#) ein Werk der Zerstörung hinterließ. 15 Meter lange und bis zu 35 Tonnen schwere Elektromagnete waren aus ihren Verankerungen gerissen und im Tunnel verschoben worden. Die fehlerhafte Verbindung war verdampft und hatte in beide Richtungen schwarzen Rauch mehrere hundert Meter weit in die ultrasauberen Strahlrohre hineingepustet.

Die Reparaturarbeiten dauerten mehr als ein Jahr. So niedergeschlagen sie anfangs waren, schüttelten die CERN-Mitarbeiter ihre Enttäuschung schnell ab und

machten sich wieder an die Arbeit. Am 20. November 2009, vierzehn Monate und 25 Millionen Euro später, schickten sie zum ersten Mal seit dem, was nur »der Zwischenfall« genannt wird, vorsichtig wieder Protonen rund um den LHC. Das war jedoch nur ein Probelauf, bei dem der Beschleuniger nur einen Bruchteil seiner maximal verfügbaren Energie einsetzte.

Im März 2010 näherten wir uns endlich dem Moment, an dem die Maschine in bislang unerforschtes Gebiet vorstoßen würde. Wir wollten Kollisionsenergien erreichen, die uns die Suche nach Dunkler Materie, dem Higgs-Boson, mikroskopisch kleinen Schwarzen Löchern und vielleicht anderen exotischen Objekten erlauben würde, von denen sich bislang niemand eine rechte Vorstellung machen konnte. Ich denke, jeder, der an diesem Morgen rund um den Tisch saß, spürte das Gewicht dessen, was wir vorhatten.

Der Projektleiter fuhr mit seinem Bericht fort und hielt nur dann mehrfach kurz inne, wenn das Dröhnen eines startenden Flugzeugs vom benachbarten Flughafen ihn übertönte. Abgesehen von einem kurzen Stromausfall waren die nächtlichen Arbeiten am LHC problemlos verlaufen, und wir waren auf gutem Wege, die Kollisionen in ein paar Tagen versuchen zu können. Dann erteilte er der Runde das Wort, woraufhin Physiker aus den Niederlanden, Spanien, Russland, Deutschland und Italien in perfektem Englisch ihre Updates lieferten. Es gab einen kurzen Eurovisionsmoment, als ein französischer Physiker den Bericht in seiner Muttersprache ablieferte. Trotz des Augenrollens rund um den Konferenztisch fuhr der

Physiker stur fort, was nicht unberechtigt war, denn Französisch ist eine der beiden offiziellen Sprachen des CERN, und schließlich waren wir hier ja in Frankreich. Trotzdem finden fast alle CERN-Meetings auf Englisch statt, und da mein Französisch nicht sehr ruhmreich ist, konnte ich der technischen Diskussion über einige Aspekte des Experiments – dafür hielt ich die Wortmeldungen zumindest – nicht ganz folgen.

Ich spürte meinen Herzschlag, als immer näher heranrückte, dass ich an der Reihe war. Ein paar Tage zuvor hatten wir ein kleineres Problem mit der Software zur Überwachung der Elektronik gehabt, was bei Anbruch des Morgens einen Panikschub im Kontrollraum ausgelöst hatte. Schließlich hatten wir das Problem mit dem üblichen Vorgehen gelöst – ausschalten und neu starten –, und seitdem lief alles glatt. Dennoch nagte in meinem Hinterkopf die Tatsache, dass ich der Ursache des Fehlers nicht nachgegangen war.

»Aus den letzten 24 Stunden gibt es nichts zu berichten«, sagte ich und hoffte, es würde keine Nachfragen geben. Zu meiner Erleichterung wandte sich der Projektleiter an das nächste Subsystem, und nach ein paar weiteren kurzen Berichten war klar: Der LHCb war startbereit.

Draußen, auf dem Parkplatz, betrachtete ich die aus den Kühltürmen aufsteigenden Dampfwolken, das einzige sichtbare Zeichen für die enorme Maschine, die unterirdisch wartete. Ich überlegte, wie viele Bewohner dieses Landstrichs zwischen dem Genfer Flughafen und

dem Jura-Gebirge wohl tatsächlich wissen, was sich unter ihren Füßen abspielt.

Etwas mehr als eine Woche später, am 30. März 2010, unternahmen LHC-Ingenieure die spektakuläre Tat, zwei Protonenstrahlen aufeinanderzuschießen, sodass sie direkt ineinanderprallen. Das lässt sich ungefähr mit dem Versuch vergleichen, zwei Stricknadeln von den gegenüberliegenden Ufern des Atlantiks so aufeinanderzuschießen, dass sie sich auf halber Strecke treffen. Als die ersten Protonen zusammenstießen, erschuf die Energie Materie, und Monitore im CERN zeigten Bilder von diesem mikroskopisch kleinen Moment der Schöpfung. Die in dem kleinen Kontrollraum des LHCb zusammengedrängten Physiker brachen in Jubel und Beifall aus. Zwei Jahrzehnte Arbeit hatten sich endlich ausgezahlt.

Dieser Tag markierte den Beginn einer gänzlich neuen Phase in der anspruchsvollsten intellektuellen Reise der Menschheit, dem jahrhundertelangen Streben, die grundlegendsten Zutaten der Natur zu erkennen und ihren Ursprung zu finden. Man könnte es auch die Suche nach dem Rezept für unser Universum nennen. Dieses Buch erzählt von dieser Suche. Es erzählt die Geschichte von Tausenden von Menschen, die im Laufe von Hunderten von Jahren die elementaren Zutaten der Materie erkannten und ihren Ursprüngen im Kosmos folgten, durchs Zentrum sterbender Sterne und bis zurück zum ersten wilden Moment des Urknalls. Diese Geschichte handelt von Chemie, atomarer, nuklearer und Teilchenphysik, Astrophysik, Kosmologie, und ich werde diese Geschichte anhand meiner persönlichen Mission erzählen, das

ultimative Rezept für Apfelkuchen zu finden. Warum gerade Apfelkuchen, werden Sie fragen. Nun ...

In der richtungsweisenden TV-Serie *Cosmos* (deutscher Titel: *Unser Kosmos*) nahm der Astrophysiker Carl Sagan die Zuschauer mit auf eine epische Reise durch das Universum, flog mit ihnen auf der Suche nach dem Ursprung des Lebens zu weit entfernten Galaxien und zeigte ihnen die Geburt und den Tod von Sternen. Da *Unser Kosmos* in den 1980er-Jahren entstand, gehörten zu dieser Reise durch Raum und Zeit eine Menge Synthesizerklänge.

Sagan, über den man wegen seiner eher bedeutungsschweren Moderation immer mal wieder spottete, übte sich in Folge 9 in etwas Selbstironie: Zu Beginn der Folge ist etwas zu sehen, was wie ein kleiner grüner Planet wirkt, der in der Leere des Raums schwebt. Sobald wir jedoch näher herankommen, wird deutlich, dass dies gar kein Planet, sondern ein Apfel ist, der unversehens zweigeteilt wird. Es folgt eine Küchenszene, in der ein recht bedrohlich wirkendes Nudelholz einen Teigklumpen ausrollt, wozu eine anschwellende Musik zu hören ist, die auch gut zu *Blade Runner* passen würde.

Die Szene endet wenig später im großen, eichenholzvertäfelten Speisesaal des Trinity College in Cambridge, wo Sagan, recht adrett in seinem typischen roten Rollkragenpullover, am Kopf einer langen gedeckten Tafel Platz genommen hat. Ein Kellner stellt einen frisch gebackenen Apfelkuchen vor ihm ab, worauf Sagan sich zur Kamera dreht und mit einem Zwinkern im Auge sagt: »Wenn Sie einen Apfelkuchen aus dem Nichts zubereiten wollen, müssen Sie zunächst das Universum erfinden.«

Das wäre eine Kochshow, die ich mir gern ansehen würde. »Heute bereiten wir bei *Das große Backen* salziges Karamellparfait zu, doch zuerst wird uns Betty Schliephake-Burchardt zeigen, wie wir Kohlenstoff synthetisieren und dazu einen sterbenden Stern verarbeiten.« Wie dem auch sei, Sagan ging es darum, zu zeigen, dass ein Apfelkuchen aus viel mehr besteht als nur aus Äpfeln und Teig. Zoomt man nur nahe genug heran, entdeckt man Billionen und Aberbillionen Atome, die von einer Supernova in den Raum geschossen oder in der glühenden Hitze des Urknalls geschmiedet wurden. Wenn man also wirklich wissen will, wie man einen Apfelkuchen backt, muss man zunächst herausfinden, wie man das gesamte Universum macht.

Den letzten Ursprung von allem zu verstehen, wird meist in hochtrabende Worte gepackt – Stephen Hawking sprach einst davon, »Gottes Plan«^[6] kennenzulernen –, doch mir gefällt Sagans alltagstauglicher Zugang besser. Wenn wir einen Apfelkuchen nehmen und ihn in immer grundlegendere Zutaten herunterbrechen und zugleich verstehen wollen, wie diese hergestellt wurden, kommen wir dann schlussendlich an einen Endpunkt? Wir werden womöglich nie den Plan Gottes kennenlernen, aber können wir dann wenigstens herausfinden, wie man einen Apfelkuchen von Grund auf zubereitet?

Um auf diese Frage eine Antwort zu finden, werden wir uns auf eine Reise rund um den Globus begeben. Wir werden einen Kilometer tief unter eine italienische Bergkette hinabkriechen, um ins Herz der Sonne schauen zu können. Wir werden auf den Gipfel eines hohen Bergs in

New Mexico klettern, wo Astronomen Botschaften entschlüsseln, die im Sternenlicht verborgen sind. Wir hören auf das Kräuseln im Stoff von Raum und Zeit inmitten der feuchten Kiefernwälder im südlichen Louisiana und schauen hinter die Kulissen eines New Yorker Labors, wo ein riesiger Teilchenbeschleuniger Temperaturen erschafft, die es seit dem Urknall nicht mehr gegeben hat. Unterwegs treffen wir auf Chemiker, Astronomen, Physiker und Kosmologen, zeitgenössische und solche aus der Vergangenheit, um uns unserem Ziel zu nähern: die Entschlüsselung der elementaren Zutaten für Materie und die Geschichte dieser Teilchen. Und wir stellen uns den Geheimnissen, die noch immer ungelöst sind, und überlegen uns, ob es Fragen gibt, die wir *niemals* werden beantworten können.

Wir bewegen uns kreuz und quer über Kontinente und Jahrhunderte, auf der Suche nach dem Rezept für unser Universum, doch wie alle Epen beginnt diese Reise zu Hause.

Kapitel 1

Elementares Kochen

Eines Nachmittags im Sommer traf ich im Haus meiner Eltern in einem südöstlichen Vorort Londons ein. Unter dem Arm trug ich einige Glasgefäße, die ich online bestellt hatte, sowie ein Paket mit sechs Portionen Mr Kipling Bramley Apple Pie. Ich war gekommen, um das wahrscheinlich schwachsinnigste Experiment durchzuführen, das ich je gewagt habe.

In seinen Kindertagen war mein Vater ein begeisterter Amateur-Chemiker gewesen, und er verbrachte Mitte der 1960er-Jahre im Schuppen im hinteren Teil des elterlichen Gartens glückliche Nachmittage unter Erzeugung von Gerüchen und Explosionen. Das waren die Zeiten, als sich noch jeder (also auch Teenager mit fortgeschrittenen Chemiekenntnissen und einer gehörigen Portion Missachtung für die eigene Sicherheit) ein erschreckendes Arsenal gefährlicher Substanzen beim örtlichen Chemikalienlieferanten besorgen konnte. Dazu gehörte, wie sich herausstellte, auch alles, was man für Schießpulver brauchte. Mein Dad erinnert sich noch heute mit gewissem Wohlbehagen daran, wie eines seiner eher dramatischen Experimente zu einem abrupten Ende gelangte, als sein eigener Vater, ein ehemaliger Artillerist, dem das Dröhnen von Gewehrfeuer durchaus vertraut war,

in die hintere Hälfte des Gartens gestürmt kam und brüllte:
»Das reicht, der eben hat die Fenster erzittern lassen!«
Ach, die guten alten Zeiten. Mein Vater besitzt noch heute ein paar Teile seines damaligen Chemiebaukastens, darunter einen Bunsenbrenner, auf den ich es nun abgesehen hatte. Ich hatte mir überlegt, dass meine kleine Londoner Wohnung nicht der ideale Ort war für das Experiment, das mir vorschwebte.

Der Gedanke hinter dem Versuch lautete: Wenn man Ihnen einen Apfelkuchen hinstellte und Sie keine Ahnung hätten von Kuchen, Äpfeln oder ihren Bestandteilen, was könnten Sie tun, um herauszufinden, aus was der Apfelkuchen besteht? Auf der Arbeitsfläche in der Garage kratzte ich, assistiert von meinem Vater, ein paar Krümel des Kuchens in ein Teströhrchen – wobei ich mir Mühe gab, eine gute Mischung aus knuspriger Kruste und weicher Apfelfüllung einzufüllen – und versiegelte es dann mit einem Korken, durch dessen Mitte ein kleines Loch gebohrt war. Nachdem ich das Röhrchen über ein L-förmiges Glasrohr mit einem zweiten Fläschchen verbunden hatte, das in kaltem Wasser schwamm, zündeten wir den Bunsenbrenner an, schoben ihn unter das Teströhrchen und traten einen Schritt zurück.

Der Kuchen begann zu blubbern und zu karamellisieren, und bald darauf drückte das sich ausbreitende Gas innerhalb des Testrohrs unsere Probe in das Verbindungsstück. Wir verringerten die Hitze ein wenig und sahen zu, wie der Kuchen langsam schwarz wurde, und zu meinem Vergnügen zogen nun Nebelschwaden das Verbindungsstück entlang und strömten in das wartende

zweite Gefäß, das kurz darauf bereits mit einem gespensterhaft weißen Dampf gefüllt war. Jetzt war das ein richtiges Chemieexperiment!

Neugierig, was dieser weiße Nebel sein mochte, schnupperte ich daran – eine probate Methode der chemischen Analyse aus den Tagen, in denen man sich um Gesundheits- und Sicherheitsrisiken wenig scherte. Schon Humphry Davy, ein Chemie-Pionier aus der Zeit der Romantik, untersuchte die medizinischen Auswirkungen verschiedener Gase mit der berühmt gewordenen Methode, sie einfach alle zu inhalieren. 1799 entdeckte er dabei die angenehmen Effekte von Distickstoffmonoxid, das heute als Lachgas bekannt ist und das er in der Folge in großen Mengen zu sich nahm, etwa wenn er sich mit seinen Dichterfreunden in einen dunklen Raum zurückzog. Hin und wieder tat er das auch in Gegenwart junger Frauen seiner Bekanntschaft. Bedenken Sie bitte, das war ein keineswegs risikoloses Vorgehen. Er stand einmal kurz davor, sich selbst umzubringen, als er mit Kohlenmonoxid experimentierte. Als man ihn hinaus an die frische Luft schleifte, bemerkte er schwach: »Ich glaube nicht, dass ich sterben werde.«^[7]

Leider produzierte mein Apfelkuchendampf keinerlei psychoaktive Effekte, sondern hatte nur einen extrem unangenehmen Gestank nach Angebranntem, der noch Stunden später in der Luft hing. Sah man durch den Dampf zum Boden des Gefäßes, konnte man erkennen, dass ein wenig des Nebels durch den Kontakt mit dem kalten Wasserbad kondensiert war und eine gelbliche Flüssigkeit bildete, bedeckt von einem dunkelbraunen, öligen Film.

Nach weiteren zehn Minuten intensiven Erhitzens schien kein Dampf mehr aus den verkohlten Überbleibseln des Apfelkuchens aufzusteigen, woraus wir schlossen, dass unser Experiment zu Ende war. In meinem Eifer, die Reste in dem Teströhrchen zu untersuchen, vergaß ich kurz, dass ein Glas, das man zehn Minuten über einem Bunsenbrenner röstet, ganz schön heiß wird, und verbrannte mir meinen Zeigefinger ziemlich fies. Es gibt gute Gründe, weshalb das gefährlichste Instrument eines Versuchs, an das ich herangelassen werde, in aller Regel ein Computer ist.

Nach deutlich längerem Warten nahm ich mich behutsam erneut des Fläschchens an und kippte seinen Inhalt auf den Tisch. Der Apfelkuchen war zu einer rabenschwarzen, steinharten Substanz reduziert worden, deren Oberfläche an manchen Stellen ein wenig glänzte. Was können wir aus diesem zugegebenermaßen eher blödsinnigen Experiment über die Zusammensetzung eines Apfelkuchens schlussfolgern? Nun, wir haben drei unterschiedliche Substanzen erhalten: einen schwarzen Feststoff, eine gelbe Flüssigkeit und ein weißes Gas, das sich in der Zwischenzeit über meine Haut, meine Haare und Kleider verteilt hatte und übel nach Verbranntem roch. Ich gebe zu, dass mir zu diesem Zeitpunkt die exakte chemische Zusammensetzung dieser drei Apfelkuchenbestandteile noch nicht ganz klar war, auch wenn ich sicher zu wissen glaubte, dass das schwarze Zeug Kohle und die gelbliche Flüssigkeit vor allem Wasser war. Um näher an die Liste der grundlegenden

Apfelkuchenzutaten zu gelangen, brauchen wir eine etwas fortschrittlichere chemische Analyse.

Die Elemente

Als Physiker sollte ich das vielleicht nicht zugeben, aber in der Schule war Chemie mein Lieblingsfach. Das Physiklabor war ein steriler, lustloser Ort, an dem man sich erfreut zeigen sollte, sobald man einen Stromkreis geschlossen oder mürrisch das Schwingen eines Pendels vermessen hatte. Das Chemielabor hingegen war ein magischer Ort, an dem wir mit Feuer und Säure spielten, einen Magnesiumstreifen anzündeten, sodass dieser gleißend verbrannte, oder farbige Tränke in hauchdünnen Gläsern zum Kochen brachten. Die Sicherheitsbrillen, die mit orangefarbenen Warnhinweisen versehenen Natriumhydroxid-Flaschen und die weißen Laborkittel, auf denen sich unidentifizierbare, vielleicht giftige Spritzer früherer Experimente abzeichneten, all das umgab das Chemielabor mit einer Aura von Gefahr. Das Kommando über all dies hatte unser rätselhafter Lehrer Mr Turner, der mit einem Sportwagen zur Schule kam und von dem man sich erzählte, er habe sein Vermögen durch die Erfindung des Aufsprühkondoms gemacht.

Und tatsächlich war es meine Faszination für die Chemie, die mich schließlich dazu brachte, Teilchenphysiker zu werden. Die Chemie beschäftigt sich, genau wie die Teilchenphysik, mit der Materie, dem Stoff der Welt, und wie die unterschiedlichen Grundzutaten miteinander reagieren, wie sie auseinanderfallen oder ihre Eigenschaften je nach bestimmten Gesetzen verändern.

Der Grund, weshalb ich nicht bei der Chemie geblieben bin, ist der, dass ich wissen wollte, woher diese Gesetze stammen. Wäre ich im 18. oder 19. Jahrhundert geboren worden, wäre ich vermutlich Chemiker geworden. Damals war Chemie, und nicht Physik, das Fach der Wahl, wollte man die grundlegenden Bausteine der Materie verstehen.

Die Person, die vermutlich mehr als jede andere für die Entstehung der modernen Chemie gesorgt hat, war Antoine Laurent de -Lavoisier, ein kecker, ehrgeiziger und unglaublich reicher junger Franzose, der in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts lebte. 1743 in eine sehr wohlhabende Pariser Familie hineingeboren, wurde er Jurist und nutzte das große Erbe seines Vaters, um sich im Pariser Arsenal ein eigenes Labor mit den ausgefeiltesten Apparaturen einzurichten, die man damals für Geld kaufen konnte. Dank der Hilfe seiner Frau und Mit-Chemikerin Marie-Anne Pierrette Paulze vollbrachte er die von ihm selbst so genannte »Revolution« in der Chemie, bei der er die alten Ideen, die noch aus dem antiken Griechenland stammten, systematisch widerlegte und an deren Stelle das moderne Konzept eines chemischen Elements entwickelte.

Die Idee, dass alles in der materiellen Welt aus einer Reihe grundlegender Substanzen, oder Elemente, besteht, ist schon Tausende Jahre alt. In den antiken Zivilisationen unter anderem Ägyptens, Indiens, Chinas und Tibets entstanden unterschiedliche Elemente-Theorien. Die alten Griechen zeigten sich überzeugt, dass die materielle Welt aus vier Elementen bestehe: Erde, Wasser, Luft und Feuer. Allerdings gibt es einen großen Unterschied zwischen dem, was die alten Griechen für ein Element hielten, und der

Definition eines chemischen Elements, wie sie heute in der Schule gelehrt wird.

In der modernen Chemie ist ein Element eine Substanz wie Kohlenstoff, Eisen oder Gold: Man kann sie nicht in etwas anderes aufschlüsseln oder in etwas anderes umwandeln. Die antiken Griechen hingegen glaubten, dass Erde, Wasser, Luft und Feuer *durchaus* in ein anderes Element verwandelt werden könnten. Die vier Elemente wurden um das Konzept der vier »Qualitäten« ergänzt: Hitze, Kühle, Trockenheit und Feuchte. Erde war kalt und trocken, Wasser war kalt und feucht, Luft war heiß und feucht und Feuer war heiß und trocken. Folglich war es möglich, ein Element in ein anderes umzuwandeln, indem man Qualitäten hinzufügte oder entfernte. Gab man beispielsweise etwa Hitze zu Wasser (kalt und feucht) hinzu, entstand Luft (heiß und feucht). Diese Materie-Theorie weckte die Hoffnung auf die Transformation oder »Transmutation« einer Substanz in eine andere durch die Anwendung von Alchemie – am berühmtesten wohl die Wandlung von einfachem Metall in Gold.

Dieses Konzept der Transmutation griff Lavoisier als Erstes an. Wie bei vielen anderen seiner großen Entdeckungen basierte auch in diesem Fall seine Vermutung auf einer simplen Annahme, nämlich dass bei einer chemischen Reaktion die Masse stets gleich bleibt. Mit anderen Worten: Wiegt man zu Beginn eines Experiments alle Zutaten und am Ende alle Produkte – wobei man sorgfältig aufpassen muss, dass kein heimtückisches Gasfährnchen entweicht –, sollten die Massen identisch sein. Chemiker hatten dies schon eine

ganze Weile vermutet, doch es war dann Lavoisier, der mithilfe einiger extrem präziser (und extrem teurer) Waagen dieser Idee zur Durchsetzung verhalf, als er 1773 die Ergebnisse seiner akribischen Versuche veröffentlichte.

[1] Mr Turner brachte mir in seinen Chemiestunden den Massenerhaltungssatz als das Lavoisier-Gesetz bei.

Was allerdings für die Transmutation sprach, ist die Tatsache, dass bei langsamem Destillieren von Wasser in einem Glasgefäß am Ende ein Feststoff übrigbleibt. Das bestätigt scheinbar die Vermutung, dass Wasser in Erde verwandelt werden kann. Lavoisier hatte da so seine Zweifel. Durch das Abwiegen des leeren Glasgefäßes vor und nach dem Experiment stellte er fest, dass es ein wenig Masse verloren hatte; und diese entsprach ziemlich genau der Masse der sogenannten Erde. Mit anderen Worten: Die Idee war Nonsens. Der zurückbleibende Feststoff bestand schlicht aus kleinen Stückchen des Glasgefäßes.

Indem er die Idee der Transmutation von Wasser in Erde beerdigte, gab Lavoisier den ersten Schuss seines Feldzugs ab, der damit enden sollte, dass die Menschen eine gänzlich neue Vorstellung von der chemischen Welt erlangten. Mit der für ihn typischen Prahlerei verkündete er seine Absicht, »eine Revolution in der Physik und Chemie« [8] anzuzetteln, und machte sich dann daran, die vier antiken Elemente zu zerstören. Sein nächster Schritt in dieser Richtung betraf das geheimnisvollste und mächtigste aller Elemente: das Feuer.

In der Mitte des 18. Jahrhunderts glaubte man, dass brennbare Materialien wie Kohle eine als »Phlogiston« bezeichnete Substanz enthalten, die entweicht, sobald man