

Erschienen in:
Zeitschrift für Theologie
(Hsg. H.J. Münk und M. Durst), Paulus Verlag:
Freiburg, 23 – 57 (2006)

Rätselhaft wie durch einen Spiegel

Arnold Benz

Von den vielen Dingen im Universum zählen Sterne zu den einfachsten. Sie bestehen aus Gas, ähnlich wie Wolken, sind nur viel grösser, so dass ihre eigene Schwerkraft sie zusammenhält und zu einer Kugel formt. Der Lernprozess, den die Astrophysik in den vergangenen 300 Jahren durchlaufen hat, um das Entstehen von Sternen immer besser zu verstehen, ist ein Lehrstück über die Methoden der Naturwissenschaften. Allein der Fortschritt in den vergangenen zwanzig Jahren ist atemberaubend und eröffnet den Blick auf eine Dynamik im Universum, die sich in Millionen und Milliarden von Jahren misst und umwälzende Veränderungen im ganzen Kosmos bewirkte. Neue Erkenntnisse zeigen aber auch, dass selbst in kosmischen Dimensionen die Komplexität der Wirklichkeit grösser ist als erwartet. Aus diesem Grund ist die Zukunft offen. Die Menschheit ist in eine kosmische Entwicklung hineingestellt, die nicht prognostizierbar ist.

1. Komplexität der Wirklichkeit

Sternentstehung als Lernprozess

Schon Isaak Newton (1643 – 1727) machte sich Gedanken darüber, wie die Sonne und andere Sterne entstehen konnten.¹ Von der kosmischen Wirkung der Schwerkraft überzeugt, stand er vor der Frage, warum die Sterne sich nicht gegenseitig anziehen und zu einem grösseren Objekt zusammenfallen. Wäre die Materie in einem unendlichen Raum gleichmässig verteilt, würde sich die Anziehung zwischen den Massen gegenseitig aufheben. Die Annahme, dass der Raum unendlich sei, war daher wichtig für ihn. Wäre die Materie im unendlichen Raum gasförmig, würden zufällige Schwankungen in der Dichte lokale Unterschiede in der Schwerkraft bilden. An Orten mit leicht erhöhter Schwerkraft könnte sich, so Newton, das

Gas zusammenziehen und einzelne Sterne bilden. Typisch für Newton und die moderne Physik nach ihm ist die Abfolge von Ursache und Wirkung, die durch eine Kraft ausgelöst wird. Was Newton nicht erklären konnte, war die Entstehung von Planeten, die um einen Zentralstern kreisen.

Fünfundzwanzig Jahre später hatte der junge Immanuel Kant eine Lösung für dieses Problem²: die Planeten könnten bereits in einer rotierenden Gasscheibe entstanden sein. Die Rotation müsste so schnell sein, dass sich die Gravitation des Sterns mit der Fliehkraft die Waage hält. Das Gas bewegte sich daher gemäss den Keplerschen Gesetzen wie ein Planet um die Sonne, noch bevor es sich zu einem Himmelskörper zusammenballte. Für Kant war damit das Hauptproblem gelöst, aber Kritiker stellten natürlich die Frage, wie denn eine solche Gasscheibe entstanden sei und warum sie genau nach den Keplerschen Gesetzen kreise.

Simon Laplace, nochmals ein halbes Jahrhundert später, konnte die Lücke in Kants Theorie elegant schliessen³: Der Drehimpuls einer interstellaren Wolke, der nie genau null ist, bleibt nach den Newtonschen Gesetzen bei der Kontraktion erhalten. Je mehr sich die Wolke zusammenzieht, desto schneller muss sie daher rotieren. Dies geht so weit, bis die Kontraktion stoppt, weil sich Schwerkraft und Zentrifugalkraft ausbalancieren. Laplace entwickelte die erste mathematisch durchdachte Theorie der Entstehung des Sonnensystems. Sie wurde so begeistert aufgenommen, dass er sie 1796 Kaiser Napoleon vorstellen durfte. Auf dessen Frage, wo denn Gott noch vorkomme in seinem Modell, gab Laplace die berühmte Antwort: „Sire, je n'avais pas besoin de cette hypothèse.“ Anscheinend ging Laplace davon aus, dass er nun alle Erklärungslücken gefüllt habe. Die Aussage hatte eine für die damalige Zeit besondere Brisanz, widersprach sie doch den Vorstellungen eines Gottes, der wie ein Uhrmacher die Welt vor dem Anfang der Zeit erschuf und dessen Tätigkeit unerklärliche Lücken hinterlassen müsste. Aber auch Laplaces Modell liess noch mindestens eine Frage offen: Wenn eine interstellare Wolke kollabiert und als eine rotierende Scheibe ins Gleichgewicht kommt, kann diese nicht weiter zu einem Stern schrumpfen. Sie müsste genau wie ein Planet oder der Ring des Saturns – wie James Maxwell später einwarf – für immer kreisen. Die Erhaltung des Drehimpulses kann zwar erklären, wie sich kreisende Planeten bilden, verhindert aber die Entstehung von Sternen. Es schien keinen Grund zu geben, warum das Gasvolumen zu einem Stern kontrahiert, warum der Drehimpuls der Planeten konstant blieb, jener der Sonnenmaterie aber verloren ging. Die Kant-Laplace-Theorie konnte zwar das Entstehen der Planeten erklären, nicht aber wie die Sonne und andere Sterne aus dem Gas der

Akkretionsscheibe entstanden sind. Der Kritikpunkt war so überzeugend, dass andere Hypothesen in den Vordergrund drängten, so zum Beispiel die Idee einer Streifkollision mit einem anderen Stern, bei der die Planeten heraus geschleudert wurden.⁴ Heute wissen wir, dass Sternkollisionen äusserst selten sind und wahrscheinlich in unserer immerhin rund 13 Milliarden Jahre alten Milchstrasse noch nie passierten. Die heutige Astrophysik ist wieder zurückgekehrt zu den Vorstellungen von Kant und Laplace, hat diese aber angereichert vielen neuen Elementen.

Von der Molekülwolke zur Akkretionsscheibe

Die Vorstellungen über Stern- und Planetenentstehung haben sich in den vergangenen zwei hundert Jahren enorm völlig verändert. Die Ideen von Newton, Kant und Laplace sind zwar immer noch aktuell, aber sie werden der heute bekannten Komplexität der Vorgänge nicht gerecht. Es spielen nicht nur Schwerkraft und Erhaltungssätze von Energie und Impuls eine Rolle. Magnetische und nukleare Kräfte, Chemie, Oberflächenphysik, kosmische Teilchen und hochenergetische Strahlung sind unerlässliche Mitspieler. Sterne sind nicht statische Gebilde, sondern Vorgänge, in denen Materie angesammelt, aber auch verändert und zum Teil wieder ausgeworfen wird. Heute wird der wissenschaftliche Fortschritt durch Beobachtungen dominiert. Theoretische Überlegungen versuchen, sie in einen Zusammenhang zu bringen. Der grösste Beitrag zum Fortschritt kam erst in den vergangenen zwei Jahrzehnten dank den neuen Beobachtungsmöglichkeiten in allen Wellenlängen von Röntgenstrahlen bis Radiowellen.

Der Raum zwischen den Sternen ist nicht leer. Das interstellare Gas ist jedoch an den meisten Orten viel weniger dicht als das beste Vakuum in irdischen Laboratorien. Die Unterschiede von Ort zu Ort sind überwältigend, um viele Zehnerpotenzen in Dichte und Temperatur, wie auch im Zustand der Materie. Das Sonnensystem und die allernächsten Sterne sind von der „Lokalen Wolke“ mit einem Radius von rund dreissig Lichtjahren umgeben. Dieses Gas mit einer mittleren Temperatur von sieben tausend Grad ist viel zu heiss, dass darin Sterne entstehen könnten. Die Lokale Wolke liegt wie eine Insel in einem noch viel heisseren Gas, der „Lokalen Blase“, mit einer Temperatur von einer halben Million Grad. Die Temperatur mag zwar beeindruckend, könnte aber einem Raumschiff nichts anhaben, weil die wenigen Atome im Gas die vielen im Raumschiff nicht wesentlich zu erwärmen vermöchten. Die

Lokale Blase mit einem Radius von 150 Lichtjahren muss vor einigen zehn Millionen Jahren durch Supernova-Explosionen in der Nähe des Sonnensystems entstanden sein. „Warme“ und heisse Gebiete von der Art der Lokalen Wolke und der Lokalen Blase machen den weitaus grössten Teil des Raumes in unserer Gegend der Milchstrasse aus, unserer galaktischen Heimat mit dreihundert Milliarden Sternen und einem Durchmesser von hunderttausend Lichtjahren.

Sterne entstehen in einer dritten Zustandsform des interstellaren Gases, in den sogenannten Molekülwolken. Sie beanspruchen nur ein Prozent des Raumes, aber einen Drittel der Masse des interstellaren Gases. Weil sie folglich sehr dicht sind, strahlen sie gut und kühlen sich bis zu minus 265 C ab. Bei diesen tiefen Temperaturen besteht die Gasmaterie zum grössten Teil aus Molekülen, vor allem aus molekularem Wasserstoff, dann auch aus Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Wasser, Ammoniak usw. Etwa ein Prozent der Masse besteht aus Staub, der im Wind früherer Sterne entstand. Obwohl sich pro Kubikkilometer nur wenige Duzend Staubkörnchen finden, machen sie Molekülwolken für Licht undurchlässig. Der Staub schützt die Moleküle in diesen dunklen, kalten Winkeln unserer Galaxie vor Ultraviolett- oder Röntgenstrahlung, welche von bereits entstandenen Sternen ausgestrahlt wird. Solche hochenergetische Strahlungen brechen Moleküle auf und zerstören sie. Glücklicherweise sind Molekülwolken jedoch transparent für Infrarot- und Millimeterwellen, genau in jenen Wellenlängen, wo kalte Moleküle in ihren Spektrallinien strahlen. Seit zwei Jahrzehnten können diese Linien vom Erdboden und von Satelliten aus mit immer besseren Teleskopen beobachtet werden und geben Informationen über Dichte, Bewegung, chemische Zusammensetzung und Temperatur des Gases. Es sind Momentaufnahmen von Vorgängen, die Jahrmillionen dauern. Daraus die Entstehung von Sternen und Planeten herzuleiten, ist wie aus vielen Photographien des 19. Jahrhunderts die typische Lebensgeschichte von Menschen jener Zeit zu rekonstruieren. Es ist eine intellektuelle Herausforderung und wird nie vollständig sein.

Die Masse von Molekülwolken übersteigt jene der Sonne um das hundert- bis millionenfache. Würde eine solche Wolke zusammenfallen, wie das Newton postulierte, gäbe es keinen Stern mit möglichen Planeten, sondern ein Schwarzes Loch⁵ aus dem keine Strahlung entweichen könnte. Die Kollapszeit von Molekülwolken wäre weniger als eine Million Jahre, so kurz, dass es in unserer Galaxie schon lange keine Molekülwolken und keine Materie mehr für neue Sterne geben sollte. Es werden heute zwei Gründe vermutet, warum Molekülwolken

mindestens einige Duzend Jahrmillionen leben, bis sie dann durch ihre eigene Sterne zerstört werden: Entweder sind die Wolken ein Tohuwabohu von turbulenten Bewegungen oder sie enthalten ein Magnetfeld, das dem Kollaps im Weg steht. Obwohl Newtons Idee im Grunde bestätigt wurde, tritt nun an seine Stelle das Rätsel, aus welchem Grund eine Molekülwolke in Stücke von der Grösse einer Sonnenmasse unterteilt wird, aus denen Sterne entstehen können.

Die uns nächste Molekülwolke liegt im Sternbild des Stiers, 500 Lichtjahre von uns entfernt. Dutzende von Sternen sind dort am Entstehen. Erste Anzeichen eines werdenden Sterns sind dunkle Wolkenkerne im Infrarot. Sie haben einen Durchmesser von einigen Lichtjahren, also etwa der Distanz von hier bis zum nächsten Stern, und sie sind dunkel, weil sie noch kälter sind als ihre Umgebung. Sie sind so kalt, dass alle Moleküle ausser Wasserstoff (H_2) auf dem Staub ausfrieren. Die Staubkörner werden dadurch von einem Mantel aus einem Gemisch verschiedenster Moleküle und Atome umgeben. Der Staub wirkt wie ein Katalysator und ermöglicht Reaktionen, die im Gas nicht stattfinden könnten. Zum Beispiel ist das meiste Wasser (H_2O), mit dem wir gedankenlos die Zähne putzen, im Mantel von interstellarem Staub entstanden.

Einige Millionen Jahre älter sind die hellen Wolkenkerne, deren Staub in infraroten Wellen Wärme abstrahlt. Diese Wolkenkerne kontrahieren bereits, was beträchtliche Mengen von Wärme freisetzt. Im innersten Teil der kollabierenden Wolke, wo die Temperatur am meisten ansteigt, verdunsten die Moleküle in den Staubmänteln und bilden ein Gas, in dem nun eine interessante Chemie zu spielen beginnt. Es entstehen grössere Moleküle, auch organische Kohlenwasserstoffe bestehend aus Dutzenden von Atomen. Die Spektrallinien der vielen Moleküle strahlen intensiv und können fast übers ganze Spektrum der Millimeterwellen beobachtet werden. Etwas über hundert verschiedene Molekülarten im interstellaren Raum sind bekannt. In heissen Kernen liegen ihre Spektrallinien so dicht nebeneinander, dass es schwierig wird, sie zu identifizieren. Noch sind viele Linien nicht identifiziert.

Der Wolkenkern kontrahiert langsam, die Dichte steigt und irgendwann überschreitet sie den Schwellwert, bei dem der Druck der Schwerkraft nicht mehr die Stirne bieten kann. Der eigentliche Kollaps setzt ein und dauert einige hunderttausend Jahre. Er beginnt im innersten Teil und produziert einen Hohlraum, der immer grösser wird. Die Materie fällt mit einigen Kilometern pro Sekunde, bis sie auf der Akkretionsscheibe ins Gleichgewicht mit der Zentrifugalkraft kommt. Ein kleinerer Teil gelangt entlang der Rotationsachse direkt auf den

Protostern, wo der Gasdruck als Gegenkraft zur Gravitation wirkt. Der Durchmesser der Scheibe beträgt typischerweise tausendmal die Distanz Erde-Sonne, und ist somit zirka einen Faktor hundert kleiner als die Dimension des ursprünglichen Wolkenkerns.

Akkretionsscheiben können in der Infrarotstrahlung ihres Staubes beobachtet werden. In den Millimeterwellen werden die Moleküllinien des rotierenden Gases gemessen, und, wenn ein schon weiter entwickelter Nachbarstern die Staubhülle des entstehenden Sterns verdampft, werden Scheiben auch für das visuelle Licht freigelegt.

Von der Akkretionsscheibe zum Protostern

Die Physiker und Naturphilosophen des 18. Jahrhunderts konnten nicht wissen, dass akkretierende Scheiben von Ausflüssen in beide Polrichtungen senkrecht zur Scheibenebene begleitet sind. Im visuellen Licht, wo die Ausflüsse stark gebündelt sind, nennt man sie Jets. Die Geschwindigkeiten betragen 100 Kilometer pro Sekunde und mehr. Jets erreichen eine Distanz von mehreren Lichtjahren, schiessen also über die Dimension des ursprünglichen Wolkenkerns hinaus und schieben eine Bugwelle vor sich her. Es ist die Schockfront zum interstellaren Gas der Umgebung.

Erst in den letzten Jahren ist der Verdacht aufgekommen und 2004 mit Rotationsmessungen des Weltraumteleskops Hubble bestätigt worden⁶, dass die Jets tatsächlich auch Drehimpuls mitführen. Somit ist das Rätsel von Laplace gelöst, wie die Rotation der Scheibe gebremst wird. Der Drehimpuls des Jets kann nur vom Drall der Scheibe stammen. Der Zerfall alter Sterne, die mit einer Supernova-Explosion endet, tragen wesentlich zum Entstehen von neuen Sternen bei. Geht der Scheibe Drehimpuls verloren, muss sie sich gemäss den Keplergesetzen zusammenziehen. Dabei fliesst im innersten Teil Materie von der Scheibe auf den Protostern ab. Die Akkretion funktioniert somit auch in der Scheibe, nun kann der Stern entstehen.

Wir haben uns allerdings nun die Frage nach der Beschleunigung von Jets eingehandelt. Es ist in der Tat fast unvorstellbar, dass Staubkörner und Moleküle wie eine Gewehrkuugel beschleunigt werden können. Eher sind Vorgänge wie in der Sonnenkorona vorstellbar, wo magnetische Kräfte Teilchen beschleunigen. Allein hier taucht das Problem auf, dass die magnetische Kraft nur auf Teilchen mit elektrischer Ladung wirken könnte. Enthält das Gas im Beschleunigungsgebiet der Jets etwa elektrisch geladene Moleküle? Es muss so sein. Als Verursacher stehen kosmische Teilchen im Verdacht, vor allem Protonen, die in weit

entfernten Supernova-Ausbrüchen von kollabierenden alten Sternen auf enorme Geschwindigkeiten nahe jener des Lichts beschleunigt wurden. Sie durchdringen selbst die dichtesten Gebiete von Molekülwolken, stossen mit Molekülen und ionisieren sie. Der Jet übernimmt einen Teil des Dralls und schleudert ihn in die Molekülwolke hinaus.

Ionisierte Moleküle sind durch die magnetische Kraft an magnetische Feldlinien gekoppelt wie Perlen an einen Draht. Sie können sich entlang des Drahts bewegen, aber nicht senkrecht dazu. Die magnetische Kraft lenkt elektrisch geladene Teilchen so ab, dass sie sich spiralförmig um eine Feldlinie bewegen. Man kann sich nun vorstellen, dass die Feldlinien im Protostern oder in der Akkretionsscheibe fest verankert sind, mitrotieren und nach aussen ragen. Die elektrisch geladenen Moleküle können nun entlang des Magnetfelds nach aussen beschleunigt werden. Das gängige Modell nimmt an, dass die Magnetlinien anfänglich etwas nach aussen geneigt sind. Sie biegen dann aber in die Polrichtungen ab, so dass der Jet in diese Richtung wegfliegt. Man kann den Vorgang leicht nachvollziehen indem man eine Schraubenmutter auf einen Stab steckt, diesen an einem Ende hält und sich im Kreis herum dreht. Biegt man den Stab nun in der äusseren Hälfte nach oben, wird die Mutter mit hoher Geschwindigkeit nach oben geschleudert.

Von der Akkretionsscheibe zu Planeten

Bevor 1995 erstmals Planeten entdeckt wurden⁷, die um fremde Sterne kreisen, konnte niemand voraussagen, dass damit alle früheren Modelle der Planetenentstehung hinfällig würden. Die neu entdeckten Planeten, inzwischen sind es über 150, sind riesige Gaskugeln von der Art des Jupiters, hundert bis tausendmal massiver als die Erde. Sie kreisen jedoch anders als Jupiter sehr nahe um den Zentralstern, wo nach den bisherigen Modellen für das Planetensystem der Sonne kein Grossplanet entstehen kann, nur allenfalls ein Zwerg wie Merkur von der Grösse unseres Mondes. Sind diese Riesen dort entstanden oder gelangten sie im Laufe einer Entwicklung an ihren jetzigen Ort? Leider kann die gängige Beobachtungsmethode nur genau diese Art von sternnahen Riesen entdecken. Planeten mit der Masse der Erde oder im Abstand des Jupiters können noch nicht beobachtet werden.

Akkretionsscheiben bestehen aus Material, das zur Bildung von Planeten nötig ist: Gas, Moleküle und Staub. Wie daraus Planeten werden, ist nicht bekannt. Gewiss könnten sie wie

Sterne durch die Eigengravitation von Dichteschwankungen entstehen, welche weitere Materie anziehen. Dieser Vorgang braucht aber mehr Zeit als zur Verfügung steht. Vermutlich sind Vorgänge am Werk, die sich selber verstärken, sogenannte Instabilitäten. Auch hier spielt vielleicht das Magnetfeld mit.

Der Protostern, der sich gleichzeitig mit den Planeten entwickelt, macht sich auf verschiedenste Weise bemerkbar. Seine Strahlung erwärmt die Akkretionsscheibe, später kommt ein Sternwind auf und Ultraviolettstrahlung beginnt. Beide tragen die Randregionen der Scheibe ab, bis schliesslich das meiste Gas entweicht. Der Staub verdichtet sich in der Scheibenebene und wird, falls er nicht von einem Planeten aufgenommen wird, schliesslich wie ein Kometenschweif ins All hinaus mitgerissen. Akkretionsscheiben sind vorübergehende Erscheinungen. Planeten haben nur etwa eine Million Jahre Zeit, um in ihnen zu entstehen.

Die Planeten, die in den vergangenen zehn Jahren um andere Sterne gefunden wurden, haben eine erstaunliche Regel zu Tage gebracht: Sie alle kreisen um Sterne mit erhöhtem Anteil an schweren Elementen – Kohlenstoff, Sauerstoff und Eisen – ähnlich der Sonne. Offenbar sind diese Elemente notwendig, damit Planeten entstehen können. Für erdähnliche Planeten wäre dies nicht bemerkenswert, nun sind jedoch alle kürzlich entdeckten Planeten eher dem Jupiter vergleichbar, der vor allem aus Wasserstoff besteht. Zur Bildung eines Planetenkerns scheinen schwere Elemente notwendig zu sein, um die sich dann eine Wasserstoffhülle ansammelt.

Vom Protostern zum Stern

Protosterne sind Gaskugeln, die von ihrer eigenen Kontraktionswärme erhitzt werden. Sie strahlen diese Energie an der Oberfläche ab, werden jedoch im Innern dichter und heisser. Wenn gewisse Schwellwerte überschritten werden, verschmelzen kleine Atomkerne zu grösseren. Den Anfang macht das seltene Deuterium, das zu Helium verschmilzt. Später passiert mit Wasserstoff, dem häufigsten Element, das gleiche aber mit grösserer Wirkung. In diesen Vorgängen kommen die Kernkräfte zum Zug und setzen nukleare Energie frei. Die Kernverschmelzung setzt eine neue Entwicklung in Gang: Der Protostern wird zum Stern. Seine innere Energiequelle versorgt ihn über Milliarden von Jahren und ermöglicht ihm einen stabilen Zustand. Sein innerer Aufbau ändert sich. Es muss so viel Energie vom Kern nach aussen transportiert werden, dass sich bei kleineren Sternen wie der Sonne eine Schicht bildet,

in der die Wärme durch Konvektionsströmungen im Gas weiter geleitet wird. In diesen Strömungen, zusammen mit der schnellen Rotation des jungen Sterns, werden wie in einem Dynamo elektromagnetische Energien und Magnetfelder aufgebaut. Die Strömungen reißen die Magnetfelder mit. Diese steigen an der Oberfläche auf und setzen ihre Energie in der Atmosphäre frei. Das Gas wird auf mehrere Millionen Grad aufgeheizt und bildet eine Korona.

Das wunderbare Zusammenspiel aller in der Physik bekannten Kräfte verändert auch die weitere Umgebung des Sterns. Die Temperatur der Korona ist so hoch, dass ihre Wärmestrahlung im Röntgenbereich liegt. Die selben Mechanismen spielen auch heute noch bei der Sonne. Die Röntgenstrahlung eines noch schnell rotierenden Jungsterns ist jedoch mehr als tausendmal stärker. Sie dringt tief in die Scheibe und Hülle ein und reagiert dort mit Molekülen. Röntgenquanten schlagen Elektronen aus den Molekülen, die dann genug Energie besitzen um in anderen Molekülen wiederum dasselbe zu tun. Jeder Quant hinterlässt eine Spur von ionisierten Molekülen. Diese sind chemisch äusserst aktiv. Ein durch Röntgenstrahlung dominiertes Netzwerk von chemischen Reaktionen baut sich auf. Je nach Dichte und Temperatur werden gewissen Moleküle auf- oder abgebaut.

Von besonderem Interesse ist das Wassermolekül. In dunklen Wolkenkernen ist es auf den Staubkörnern ausgefroren und hüllt sie mit einem Eismantel ein. Steigt die Temperatur beim Kollaps auf über minus 150 Grad Celsius, verdampft das Wasser und beginnt, mit anderen Molekülen zu reagieren. Es bildet sich ein chemisches Netzwerk von Reaktionen, in dem Wasser entsteht und wieder zerstört wird, bis sich Gleichgewicht einstellt. Die Häufigkeit von Wasser wird von den gegebenen Verhältnissen bestimmt. Von Sternen mit der Masse der Sonne wird Wasser durch Röntgenstrahlung in Sternnähe bis etwa die dreifache Erde-Sonne Distanz zerstört.⁸ Es wird nicht direkt in Sauerstoff und Wasserstoff aufgespalten, sondern reagiert mit anderen Molekülen, wie H_3^+ und HCO^+ , die durch hochenergetische Photonen produziert werden. Übersteigt die Temperatur jedoch minus 20 Grad Celsius, entsteht Wasser durch Verbindungen anderer Moleküle. Moleküle wie Wasser durchlaufen eine Geschichte, die je nach Distanz zum Zentrum verschieden ist. Ihre Häufigkeiten können als Indizien für Entwicklung und physikalische Parameter verwendet werden. Um Moleküle als chemische Uhren zu gebrauchen, sind sie allerdings noch zu wenig bekannt.

Der Druck in der Korona des jungen Sterns übersteigt die Schwerkraft. Daher fließt die Korona als starker Sternwind in den Weltraum ab, wird aber durch die magnetische Heizung dauernd neu erzeugt. Der Sternwind und die Hochenergie-Strahlungen des Jungsterns tragen wie bereits erwähnt die Akkretionsscheibe ab. Sie reichen aber weiter in den Raum hinaus und pusten sämtliche Überreste des ursprünglichen Wolkenkerns weg. Auf diese Weise verhindert der Stern sein weiteres Anwachsen. Es wäre sonst nicht auszuschließen, dass seine Masse weiter wächst und schließlich die Schwelle zu einem Schwarzen Loch überschreitet. Es ist erstaunlich, wie selten solche kosmischen Missgeschicke sind, vermutlich ereigneten sie sich nur im frühen Universum. Die Schwarzen Löcher im Zentrum von Galaxien sind möglicherweise Indizien dafür.

Fazit

Aus den skizzenhaften Ausführungen geht hervor, dass viele Details dieser Vorgänge noch unbekannt sind. Es gibt noch viele offene Fragen, offensichtlich weit mehr als Kant und Laplace vor 200 Jahren hatten. Jede Antwort provozierte mehrere neue Fragen. Die ungelösten Probleme vermehren sich wie die Häupter der Medusa. Der Entwicklungsprozess umfasst erstaunlich viele Vorgänge, die ablaufen müssen, damit ein Stern, umringt von einem Planetensystem, sich bilden kann. Das Schöne daran ist, dass noch Arbeit und Entdeckungen bleiben für viele Generationen von Astrophysikern. Die Erforschung der Stern- und Planetenentstehung scheint grenzenlos zu sein.

Man darf mit Recht fragen, ob denn die naturwissenschaftliche Methode konvergiere. Offensichtlich wird die Komplexität der Wirklichkeit immer wieder unterschätzt. Der Grund liegt wohl darin, dass in den kontrollierten Laborexperimenten der Physik die Wirklichkeit auf wenige Grundgleichungen reduziert wird. Das Beispiel der Sternentstehung zeigt hingegen, welche Fülle von Komplexität sich durch wechselwirkende Elemente daraus bilden kann. Auch wenn wir eines Tages alle Grundgleichungen kennen, würden wir noch lange nicht die gesamte Wirklichkeit verstehen. Die gegenwärtige Front der Forschung ist eine Grenze in dauernder Bewegung. Sie dringt immer tiefer ins Verständnis der kosmischen Ursprünge und Vorgänge vor. Wegen der Komplexität des Universums wird diese Grenze nie verschwinden.

Das Beispiel der Kant-Laplace-Theorie erinnert an das bekannte Problem bei der Bestimmung der Küstenlänge von Europa. Misst man sie mit einem Faden auf einer Landkarte, scheint dies kein Problem zu sein. Will man es aber genauer wissen und geht im Freien mit einem Messband an die Arbeit, erhält man eine grössere Strecke, weil auch kleinere Einbuchtungen erfasst werden. Die Frage lässt sich nicht abschliessend beantworten, denn es könnte jemand gar mit einem Mikroskop messen und erhielte wieder ein grösseres Resultat. Bessere Mikroskope gäben noch grössere Werte. Die Frage nach der Küstenlänge lässt sich nur befriedigend beantworten, wenn wir die Skalenlänge angeben, die uns wichtig ist. Wenn wir sie zum Beispiel abschreiten wollen, wäre es die Meterskala. Auf die Sternentstehung angewandt, verstehen wir immer mehr und eines Tages vielleicht alles, was wir wissen wollen. Wir werden aber nie alles so vollständig kennen, wie in Uhrmacher eine Uhr versteht. Dabei gehören Sterne doch zu den einfachsten Objekten, die im Universum entstehen.

Die Fortschritte im Verständnis der Sternentstehung erinnern an ein Wort von C. F. v. Weizsäcker: „Die Physik erklärt die Geheimnisse der Natur nicht weg, sie führt sie auf tieferliegende Geheimnisse zurück.“ Im Wort Geheimnis tönt auch eine subjektive Komponente an. Dieser Wesenszug macht auch das Staunen möglich, selbst wenn „mechanische“ Erklärungen vorliegen. Dass ein Geheimnis bleibt, bedeutet eine Kränkung der naturwissenschaftlichen Vernunft. Ein Objekt mit Geheimnis bewahrt eine gewisse Distanz und ist nicht vollständig verfügbar. Die Prophezeiungen der Aufklärung und die Angst vieler Menschen, die Naturwissenschaften würden einmal alles erklären, sind unbegründet.

2. Vor einer offenen Zukunft

Nach dem heutigen Wissensstand der Astrophysik hat sich das Universum mit einer ungeheuren Dynamik entwickelt. Die Sternentstehung und die Bildung von Planeten stellen nur Teilprozesse dar, die auf kosmischen Vorgängen im frühen Universum wie der Materiebildung aus Quarks und der Galaxien-Entstehung aufbauen. Die Entwicklung auf immer wieder neuen Stufen ist eine fundamentale Eigenschaft des Kosmos. Dabei spielt die Zeit eine wichtigere Rolle, als früher angenommen wurde. Das Neue entstand nicht in einer mythischen Vergangenheit vor dem Anfang der Zeit, sondern mit der Zeit und infolge der Zeit.

Die grosse Erkenntnis der Astrophysik in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts war, dass das Universum eine Geschichte hat. Der Kosmos ruht nicht im ewig gleichen Zustand. Ohne die Entwicklungen im Universum hätte der Mensch gar nicht entstehen können. Wir sind ein Teil der kosmischen Geschichte. Und diese Geschichte geht weiter. Bereits am Anfang der Astronomie vor mehr als viertausend Jahren, als es Menschen gelang, aus dem Stand der Gestirne die Jahreszeiten zu bestimmen und vor den jährlichen Überschwemmungen des Nils zu warnen, spielte die Zukunft eine wichtige Rolle. Heute kann viel mehr vorausberechnet werden: zukünftige Planetenbahnen, die Lebensdauer der Sonne oder die Entwicklung von Galaxien. Wie stehen die Prognosen für Erde, Milchstrasse und schliesslich für das ganze Universum?⁹

Zukunft der Erde

Die Erde ist ein Teil des Universums und tief in seine Entwicklung eingebettet. Unsere nähere Umgebung wird dominiert durch die Sonne und die Planeten. Aber auch Asteroiden, Kometen und kleinste Körper bis zur Grösse von Staubkörnern bewegen sich auf elliptischen Bahnen quer zu den planetaren Kreisen. Die Bahnen kreuzen sich, und es kommt gelegentlich zu Kollisionen oder Meteoriteneinschlägen, wie wir sie auch nennen. Die Zahl der Einschläge wird aus Kraterzählungen auf Mond, Erde und Mars bestimmt. Sie ist im inneren Sonnensystem seit mehreren Milliarden Jahren konstant geblieben. Die Wahrscheinlichkeit eines Einschlags kann daher annäherungsweise berechnet werden.

Die Zahl der kleinen Körper übertrifft jene der grossen. Daher ist es viel weniger wahrscheinlich, dass ein grösseres Objekt einschlägt. So ist zum Beispiel mit dem Einschlag eines Meteoriten mit einem Durchmesser von einem Kilometer, etwa von der Grösse jenes, der das Nördlinger Ries in Süddeutschland verursachte, durchschnittlich alle drei Millionen Jahre zu rechnen. Die Energie entspricht der Detonation von 100 Gigatonnen TNT, und der aufgewirbelte Staub kühlt das Erdklima für Jahre ab. Man kennt heute etwa 200 Asteroiden dieser Grösse, welche die Erdbahn kreuzen und zum Teil die Erde oder den Mond treffen werden. Es gibt

aber wahrscheinlich noch fünfmal mehr solche Objekte, also etwa 1000. Die Chancen, dass ein Objekt dieser Grösse in den nächsten tausend Jahren einschlagen wird, steht 1 : 3000. Gut bekannt ist zum Beispiel der Asteroid Eros mit 20 km Durchmesser und einer 5%igen Wahrscheinlichkeit, dass er in den nächsten 100 Millionen Jahren auf die Erde einschlagen wird¹⁰. Die Katastrophe wäre grösser als jene vor 65 Millionen Jahren, in deren Folge die Saurier ausstarben.

Die einzelnen Himmelsobjekte haben die bemerkenswerte Eigenschaft, dass ihre Bahnen nicht beliebig weit in die Zukunft voraus berechnet werden können. Die Sonne wie auch mehrere Planeten bestimmen die Bahn eines Planetoiden. Sie beeinflussen sich aber auch gegenseitig und bilden zusammen ein nicht-lineares System. Ein Fehler, wie man ihn bei der Bahnberechnung wegen ungenauer Anfangswerte immer macht, wächst in solchen Fällen meistens exponentiell: anfangs langsam, dann immer schneller. Dies bedeutet, dass nach einer gewissen Zeit – der sogenannten Lyapunov-Zeit – die Ungenauigkeit dermassen stark anwächst, dass auch ein verbesserter Anfangswert keine wesentliche Verlängerung der Voraussagezeit bringen würde. Man nennt dieses Verhalten „chaotisch“, weil die Zukunft des Systems nicht mehr berechenbar ist. Bei manchen Asteroiden ist die Voraussagezeit nur einige hundert Jahre. Chaos im Sonnensystem bedeutet unter anderem, dass wir nicht berechnen können, an welchem Datum der nächste Himmelskörper auf der Erde einschlagen wird. Langfristig müssen wir uns mit Wahrscheinlichkeitsangaben begnügen.

Die Bahnen der Nachbarsterne sind ebenfalls chaotisch. Daher lässt sich nicht langfristig voraus berechnen, welche Sterne dem Sonnensystem nahe kommen oder welche gar in ihrem Endstadium als Supernova in unserer Nähe explodieren und mit ihrer Einstrahlung die irdische Umwelt über Jahre hinaus verändern werden. Die Wahrscheinlichkeit ist einmal in hunderttausend Jahren.

Trotz dieser Katastrophen wird das Leben auf der Erde weiter blühen; aber nicht für immer. Die Sonne hat bereits einige Prozente ihres Wasserstoffs zu Helium verschmolzen, der Druck im Kern ist angestiegen und die Verschmelzungsrate steigt. Seit der Entstehung hat die Leuchtkraft der Sonne um 40% zugenommen. Unser Zentralgestirn wird in 5,5 Milliarden Jahren in die Phase des Roten Riesen eintreten.

Zwar sinkt die Oberflächentemperatur dann auf 3000°C, aber der Sonnendurchmesser steigt ums Hundertfache, sodass die Abstrahlung weiter zunimmt. Aus diesem Grund wird die Temperatur auf der Erde weit über tausend Grad Celsius ansteigen, zu heiss für jegliches Leben. Unser Planet wird in spätestens zwei Milliarden Jahren für uns nicht mehr bewohnbar sein.

Nach der Rote-Riesenphase zieht sich die Sonne zu einem Weissen Zwerg zusammen und kühlt über Billiarden von Jahren langsam aus. Da sie aber nur noch die Grösse der Erdkugel haben wird, kann sie die Erde nicht wärmen. Nach der Glutofenhitze wird sich auf der Erde die Temperatur des Weltraums von minus 269 Grad Celsius einstellen.

Die zukünftige Entwicklung des Universums

Vielleicht wird das Leben dann in andere Planetensysteme auswandern. Aber auch dies ist nicht für unendlich lange möglich. Es entstehen heute zwar immer noch etwa zehn neue Sterne pro Jahr in der Milchstrasse. Es gibt noch Wasserstoff für etwa 100 Milliarden weitere Sterne in unserer Galaxie. Die letzten Sterne werden wahrscheinlich am Rande der Milchstrasse entstehen, vielleicht ausgelöst durch eine Kollision mit einer anderen Galaxie. Irgendwann, in etwa 10 Billionen Jahren (10'000'000'000'000), wird aber die Epoche des Sternenlichts zu Ende gehen. Die letzten Weissen Zwerge kühlen aus und kein Stern wird mehr leuchten.

Durch Sternbegegnungen geht der Milchstrasse Energie verloren, zum Teil in Form von Gravitationswellen, zum Teil durch Sterne, die aus der Galaxis geschleudert werden. Die Bahnen der verbleibenden Sterne werden kleiner, der Durchmesser der Milchstrasse schrumpft, und die Überreste längst erloschener Sterne verschwinden in spätestens 10 Trillionen (10^{19}) Jahren im zentralen Schwarzen Loch der Milchstrasse. Schwarze Löcher sind Gebiete mit hoher Materiedichte, in denen die Schwerkraft so gross ist, dass selbst das ausgestrahlte Licht wieder zurückfällt. Im Zentrum der Milchstrasse, fünfundzwanzigtausend Lichtjahre von hier, befindet sich ein Schwarzes Loch mit drei Millionen Sonnenmassen.¹¹

Bis vor kurzem war nicht klar, ob es das Universum in 10 Trillionen Jahren noch geben wird. Das Universum ist erst 13,7 Milliarden Jahre alt und könnte nach der jetzigen Expansionsphase wieder kollabieren. Die neusten Beobachtungen mit dem Hubble-Teleskop legen jedoch eine unendliche Expansion des Universums nahe. Das Universum wird demnach immer grösser und hat eine unbeschränkte Lebensdauer. Gemäss der wichtigsten physikalischen Theorien zerfallen aber die Protonen und mit ihnen alle Materie in etwa 10^{33} Jahren. Bei ihrem radioaktiven Zerfall entstehen Positronen und Photonen.

Auch die Schwarzen Löcher leben nicht unendlich lange. Sie strahlen eine geringe Wärmestrahlung ab, derzufolge sie in 10^{100} Jahren schliesslich verdampfen werden. Zuletzt würde das Universum nur noch aus Photonen, Elektronen und Positronen bestehen¹². Aussagen über diese ferne Zukunft des Universums sind allerdings wegen der unsicheren physikalischen Theorien noch sehr spekulativ.

Möglichkeiten und Zuverlässigkeit wissenschaftlicher Prognosen

Wie zuverlässig eine wissenschaftliche Voraussage ist, hängt davon ab, ob sie den Abbau eines Vorrats betrifft oder den Zustand eines Systems. Im ersten Fall, hängt die Zukunft nur vom Anfangswert und der Verbrauchsrate ab. Bei der Berechnung der Lebenszeit der Sonne muss berücksichtigt werden, dass die Energiefreisetzung nicht konstant ist. Sie kann aber an älteren Sternen beobachtet werden, die in ihrer Entwicklung schon weiter fortgeschritten sind. Dies wird in der Berechnung entsprechend berücksichtigt. Die Modelle können somit getestet werden, was ihre Vorhersage immer zuverlässiger macht.

Im zweiten Fall, bei Systemen mit mehreren wechselwirkenden Elementen, wie zum Beispiel im Planetensystem, ist dies anders. Die Entwicklung solcher Systeme ist chaotisch. Voraussagen über ihr dynamisches Verhalten können weder genau noch zuverlässig gemacht werden. Beispiel: Die Erdbahn kann kurzfristig sehr genau vorausberechnet werden, wie Sonnenfinsternisse eindrücklich zeigen. Aber dies gilt nur für die nächsten 100 Millionen Jahre. Wir kennen die Position der Erde im Sonnensystem auf 15 Zentimeter genau. Wollten wir berechnen, wo auf ihrer Bahn

die Erde in 200 Millionen Jahren sein wird, müssten wir die heutige Position nicht doppelt genau kennen, sondern etwa auf einen Atomdurchmesser genau. Auch die Erdbahn ist chaotisch wegen der Wechselwirkungen mit anderen Planeten.

Die physikalischen Gesetze und Erhaltungsgrößen geben auch einen festen Rahmen für die Entwicklung sehr komplexer Systeme. Sehr gut belegt ist zum Beispiel, dass die Energie eines abgeschlossenen Systems konstant bleibt. Dieser Rahmen legt einen Bereich von Entwicklungen fest, die überhaupt möglich sind. Gerade in komplexen Systemen kann dieser Bereich aber unvorstellbar gross sein.

Innerhalb des Rahmens der Erhaltungssätze entwickeln sich viele natürliche Systeme im Universum chaotisch, weil ihre Elemente miteinander in Wechselwirkung stehen. Obwohl ihre Entwicklung im Prinzip durch bekannte Gleichungen exakt determiniert ist, lassen sie sich nicht im Detail vorausberechnen. Für uns bleibt die Entwicklung des Universums offen.

Entstehen und Zerfallen

Die Offenheit der Zukunft kann nicht darüber hinweg täuschen, dass alle uns bekannten Himmelskörper (und nicht nur sie!) Alterungsprozessen unterworfen sind und schliesslich zerfallen. Ihr Zerfall hat einen zwingenden Charakter. Mit dem Entstehen ist die Entwicklung nicht abgeschlossen. Da sich fortwährend Energie umsetzt, die eines Tages erschöpft sein wird, geht das Entstehen nahtlos über ins Vergehen. Der Zerfall ist die Kehrseite des Entstehens. Die Kreativität im Universum impliziert auch schon das Vergehen von allen Dingen. Wir müssen akzeptieren in einem Universum zu leben, in dem alles zerfällt.

Wie im ersten Kapitel dargestellt, ist es auch ein Universum, in dem Neues entsteht, Anderes und noch nie da Gewesenes. Es ist erst wenige hunderttausend Jahre her, seit das menschliche Bewusstsein entstand, ein Augenblick im Vergleich zu den Zeiträumen seit dem Urknall. Neues entsteht noch in der Gegenwart.

Wird auch in Zukunft Neues entstehen? Das Neue lässt sich nicht voraussagen. Es entsteht spontan und chaotisch, weil sich das Universum nicht wie ein Uhrwerk verhält und sich nicht linear entwickelt. Wie sollte die Naturwissenschaft etwas noch nie Dagewesenes voraussagen können? Die zukünftige Entwicklung des Universums ist daher zu einem guten Teil offen. Dieser offene Teil betrifft weniger den Zerfall – der fest steht – als das Entstehen von Neuem.

3. Grenzen der Astrophysik

Sachliche Grenzen

In der scheinbar grenzenlosen Komplexität der Sternentstehung und Entwicklung des Universums sind wir implizit auch auf sachliche Grenzen gestossen. Dieser Tage feiert die berühmteste dieser Grenzen, die Lichtgeschwindigkeit, ihr 100jähriges Jubiläum. Die Grenze folgt aus der Speziellen Relativitätstheorie und zählt demnach zu den theoretischen Grössen. Theorien sind grundsätzlich unsicher und falsifizierbar. Es würde genügen, ein einziges Objekt mit höherer Geschwindigkeit zu entdecken, um die Theorie zu widerlegen. Das ist seit hundert Jahren nicht geschehen. Es wäre töricht, viel Zeit und Geld für eine Widerlegung aufzuwenden, die wenig Aussicht auf Erfolg hätte. Offensichtlich war es bislang erfolgreicher, die Grenze der Lichtgeschwindigkeit zu akzeptieren. Sachliche Grenzen sind jedoch wie alle Theorien nicht absolut sichere Wahrheiten.

Das Phänomen des Schwarzen Lochs impliziert eine zweite Grenze. Übertrifft die Masse eines Sterns jene der Sonne um das Dreifache, kontrahiert der Stern, nachdem er seine nukleare Energie aufgebraucht hat, zu einem Objekt mit weniger als einigen Dutzend Kilometern Durchmesser. Dabei wächst die Gravitation umgekehrt zum Quadrat des kleiner werdenden Radius. Schliesslich verschwindet der Stern hinter dem Ereignishorizont, durch den kein Objekt nach aussen dringt. Schwarze Löcher kann man nur indirekt an ihrer Schwerkraft erkennen, die auf andere Sterne wirkt. Aus deren Umlaufgeschwindigkeit sind heute etwa ein Dutzend Schwarzer Löcher in unserer eigenen Galaxie bekannt, sowie im Galaxienkern ein supermassives Schwarzes Loch von drei Millionen Sonnenmassen. Die Oberfläche dieser Schwarzen Löcher, ab der nichts mehr entweichen kann, ist eine räumliche Grenze, die es unmöglich macht, das Gebiet dahinter zu beobachten oder zu erforschen.

Dass sich heute noch Sterne bilden, impliziert eine weitere Grenze. Die Sterne verschmelzen Wasserstoff und verbrauchen den Vorrat. Weil dies nicht über unendlich lange Zeit möglich ist, muss es einen Anfang geben. Der Wasserstoff, aus dem die Sterne grösstenteils entstanden sind und heute noch entstehen, bildete sich im Urknall. Der Anfang des Universums kann heute genau datiert werden. Er liegt 13,7 Milliarden Jahre zurück. Am besten lässt sich der Urknall als eine spontane Quantenfluktuation eines Vakuums vorstellen. Damit ist spekuliert, dass die physikalischen Symmetrien, wie Energie- und Ladungserhaltung, bereits galten. Das Universum stimmt mit diesen Annahmen überein, soweit wir sie überprüfen können. Weil die Physik im ganz frühen Universum aber nicht bekannt ist – es gibt nur sehr spekulative Theorien – wissen wir noch wenig über die ersten Nanosekunden.

Physikalisch gesehen bildet der Urknall einen Horizont in der Zeit. In vielem gleicht er dem räumlichen Ereignishorizont von Schwarzen Löchern. So greifen naturwissenschaftliche Methoden ebenfalls ins Leere, wenn man fragt, was dahinter liege. Weil man nicht hinter den Horizont blicken kann, gibt es darüber auch nichts Naturwissenschaftliches auszusagen. Zweifellos wird es Fortschritte geben im Verständnis der Grenzgebiete (z.B. durch eine quantisierte Gravitationstheorie), und die Grenzen werden nie ganz gefestigt sein. Mit grosser Wahrscheinlichkeit werden wir uns aber an sie gewöhnen müssen.

Methodische Grenze

Zur Frage nach Gott: Die modernen Naturwissenschaften haben wie bereits Laplace keinen Punkt gefunden, an dem nur die Annahme einer göttlichen Intervention weiterhelfen würde. Dies widerlegt frühere Erwartungen, dass es eine Grenze gebe zwischen der irdischen Physik und den Gesetzen des Himmels. Es gibt zwar viele Wissenslücken, eine grenzenlose Komplexität und sachliche Grenzen. Aber diese Lücken und Grenzen liegen innerhalb der von der Physik erforschten Natur. Darüber hinaus wird nicht spekuliert, weil es naturwissenschaftlich nicht von Bedeutung wäre.

In seiner Metaphysik ging Aristoteles über die naturwissenschaftlich beobachtbaren Grössen hinaus. Die aristotelischen Konzepte wurden im Mittelalter mit dem biblischen Schöpfungsglauben verbunden. Als sich die moderne Naturwissenschaft von Aristoteles löste, kam es dann zu den bekannten Konflikten mit der Theologie (z.B. im Fall Galilei). Die

moderne Naturwissenschaft schliesst Gott als metaphysisches Prinzip aus, weil sie auf keine Phänomene gestossen ist, die weder als kausal noch als Zufall zu erklären sind. Antimaterie, gekrümmter Raum, grenzenlos grosse und kleine Zahlen sind keine Grenzen mehr. Die menschliche Vorstellungskraft hat sie erstaunlicherweise alle überschritten. Auch sachliche Grenzen sind nicht die Grenzen zur Metaphysik. Gewiss gibt es noch einige Knacknüsse - die seit mehr als 50 Jahren gesuchte Quantengravitationstheorie und Wissenslücken in der Sternentstehung wurden bereits erwähnt - und bestimmt vieles, von dessen Existenz wir noch gar nichts wissen. Sie sind jedoch keine Indizien für Gott.

Dass der Begriff „Gott“ in der Naturwissenschaft (d.h. in der Fachliteratur) nicht vorkommt, liegt an ihrer Methode. Sie schliesst religiöse Wahrnehmungen und Erfahrungen aus, womit sie selber die weitaus folgenreichste Grenze zieht. Wie sie sich auswirkt, möchte ich an einem Beispiel schildern, das von Blaise Pascal überliefert ist¹³. Er beschreibt ein mystisches Erlebnis mit den Worten: "Feuer! – Gott Isaaks, Gott Abrahams, Gott Jakobs, nicht der Philosophen und Gelehrten. Gewissheit, Freude, Friede... Vergessen von der Welt und von allen, ausser von Gott .". Mit Feuer umschreibt er metaphorisch seine unmittelbare Wahrnehmung. Was Pascal wahrgenommen hat, wissen wir nicht genau, denn die Wahrnehmung ist an seine Person gebunden. Wir können es nur mit ähnlichen Wahrnehmungen anderer Menschen oder eigenen Erfahrungen vergleichen. Das hat auch Pascal gemacht. Er interpretiert sie als Gotteserfahrung, indem er sie in Beziehung zu Berichten aus dem Alten und Neuen Testament setzt. In seine physikalischen Arbeiten bringt er diese persönliche Erfahrung aber nicht ein. Bereits im 17. Jahrhundert hätte dies der naturwissenschaftlichen Methode widersprochen.

Sind die Wahrnehmungen von Blaise Pascal real? Auf jeden Fall sind sie nicht quantifizierbar. Sie sind auch nicht rein objektiv, denn er selber nimmt wesentlich daran teil. Daher ist die Wahrnehmung nur sehr beschränkt mitteilbar. Das Erlebnis bekam eine grosse Bedeutung in seiner Biographie. Es gab ihm eine Grundgewissheit, die ihm niemand entziehen konnte und die nicht ohne Wirkung auf sein Denken blieb. Von Wirklichkeit zu sprechen ist daher naheliegend, obgleich diese Wirklichkeit nicht objektiv ist.

Pascals mystisches Erlebnis ist nicht objektiv nachvollziehbar, weil es an seine Person gebunden bleibt. Teilnehmende Wahrnehmungen gehören nicht zur konstituierenden Basis der Naturwissenschaften. Was anfangs nicht zur Methode gehört, taucht auch im Laufe der

naturwissenschaftlichen Tätigkeit nicht auf. Die Naturwissenschaften werden daher nicht auf Gott stossen, sofern damit Wahrnehmungen von der Art Pascals erforderlich sind. Teilnehmende Wahrnehmungen können und müssen von den Naturwissenschaften nicht erklärt werden. Hier liegt eine *methodische* Grenze vor.

4. Teilnehmende Wahrnehmungen

Teilnehmende Wahrnehmungen der Natur

Sterne, die wir in einer klaren Nacht betrachten, können zu einem weiteren Beispiel werden für Wahrnehmungen, die über den Bereich des naturwissenschaftlichen Messens hinausgehen. Unsere Netzhaut registriert ihre Photonen. Nun kann ein Mensch auf diese Photonen verschieden reagieren. Wir können ihre Farbe und Intensität beobachten und in Zahlen festhalten. Oder wir können, wenn wir es zulassen, von der Gegenwart dieser Sterne berührt sein. Wir fühlen uns mit den Sternen verbunden. Wir sehen Licht, das hunderte von Jahren unterwegs war und messen dies mit unserer eigenen Lebensspanne. Die Sternatmosphäre, in der das Licht ausgestrahlt wurde, ist tausende von Grad heiss. Danach durchquerte dieses Licht unvorstellbar grosse Räume mit lebensfeindlicher Kälte. Wir staunen, dass es unseren Lebensraum mit moderaten Temperaturen gibt. Dass es uns selbst gibt! Der Horizont weitet sich, und wir nehmen uns selbst als Teil von etwas Grösserem wahr. Wie Schuppen fällt es vielleicht von den Augen, wie klein wir sind an körperlicher Grösse, wie kurz unser Leben, wie schön unser Planet, oder wie leicht unser Geist in die entferntesten Gegenden des Universums schweben kann. Das intuitive Sichfinden in der Welt liegt ausserhalb des Rahmens der objektiven Wissenschaft, ist jedoch eine Erfahrung, die zur Orientierung hilft und somit lebenswichtig sein kann.

Am Wahrnehmungsprozess dieser zweiten Art nimmt der Mensch anders als nur durch reines Messen und Beobachten teil. Nicht nur das Auge, der Mensch selbst mit seinem Bewusstsein und seinen Gefühlen ist das Messinstrument. Ich nenne es daher ein teilnehmendes Wahrnehmen, in das der Mensch involviert ist. Mit seiner Teilnahme bringt er auch Subjektives hinein. Es gibt Leute, welche diese Art von Wahrnehmungen als nur subjektiv, nur Illusion oder nur Wunschdenken bezeichnen, ausgelöst von einem Geflunker hirnhysiologischer Fehlleistungen. Dies alles ist möglich, aber das ausschliessende „nur“

scheint mir unbegründet. Natürlich kann man an dieser Art von Wahrnehmungen auch achtlos vorbei gehen, wie an einem schönen Gemälde im Kunsthaus. Ja, es braucht ein Wollen, sich auf diese Art von Wahrnehmung einzulassen.

Das Staunen rückt eine andere Art von Wahrnehmen ins Blickfeld. Es ist nicht die objektive Art der Naturwissenschaften, aber auch nicht ein rein subjektives Geschehen, denn es ist auf ein Objekt gerichtet. Diese Wechselbeziehung zwischen Objekt und Subjekt erinnert an Resonanzphänomene in der Physik, wenn eine äussere Einwirkung, wie zum Beispiel ein Violinbogen, eine Saite zum Schwingen bringt.

Zwei Ebenen

Im Staunen erhält die Natur eine Tiefendimension, in der das Unverfügbare mitten in der alltäglichen Wirklichkeit erscheint. Auch Blaise Pascal bezieht sich auf eine Wahrnehmung, die nur einem teilnehmenden Menschen zugänglich ist. Im Gegensatz dazu verlangen die methodischen Voraussetzungen der Naturwissenschaft, dass Messungen und Beobachtungen reproduzierbar und objektiv sein müssen und dass Forschende austauschbar und die Resultate von ihnen unabhängig sind. Hier taucht die entscheidende Frage auf: Ist das die ganze Wirklichkeit? Ist der naturwissenschaftlich erfassbare Bereich nicht durch die Wahl der Beobachtungen eingeschränkt? Unter „Wirklichkeit“ reihe ich alles ein, was bleibende Wirkung hat. Illusionen haben zwar Wirkungen, die aber langfristig nicht bestehen können.

Eine religiöse Wahrnehmung lässt sich nicht völlig vom betroffenen Menschen ablösen, auch wenn der oder die Wahrnehmende sie nicht als rein subjektiv empfindet. Manchmal bezieht sie sich auf Wahrnehmungen eines äusseren Objekts oder Geschehens und wird von vielen Menschen ähnlich wahrgenommen. Die Wirkung der religiösen Erfahrung zeugt von ihrer Wirklichkeit. Der beteiligte Mensch selbst ist das eigentliche Messorgan und daher nicht austauschbar. Religiöse Erfahrungen haben eine gewisse Ähnlichkeit mit Kunsterlebnissen, die man metaphorisch als Resonanzphänomene zwischen einem objektiven Gegenstand, z.B. einem Gemälde, und einem Menschen beschreiben könnte.

Es folgt daraus, dass die Ausgangspunkte von Naturwissenschaft und Religion grundverschiedene Wahrnehmungen sind. Die verschiedenen Erfahrungsarten spannen in der

Folge auch zwei verschiedene Ebenen von Sprache und Methode auf. In der gegenwärtigen Diskussion zwischen Naturwissenschaft und Theologie führt es immer wieder zu Missverständnissen und falschen Erwartungen, wenn diese beiden Ebenen der Wahrnehmung nicht auseinander gehalten werden. Die Verschiedenheit ist der Grund dafür, dass die Naturwissenschaft weder Gott begegnen wird, noch ihn widerlegen kann. Es ist aussichtslos, in wissenschaftlichen Resultaten einen Beweis für Gott zu suchen. Von naturwissenschaftlichen Messungen führt kein direkter Weg zu religiösen Erfahrungen, denn sie finden auf verschiedenen Ebenen statt.

Ein anderer Ursprung

Dieser Gottesbegriff ist im rein naturwissenschaftlichen Sprachspiel nicht plausibel zu machen¹⁴, weil er sich letztlich auf teilnehmende Wahrnehmungen beziehen muss, die im naturwissenschaftlichen Bereich nicht enthalten sind. Zum Beispiel kann die Zweckmässigkeit beim Entstehen von Sternen zum Staunen anregen. Hat ein Mensch eine Beziehung zu Gott aufgrund anderer Erfahrungen, kann er in der Sternentstehung neben der kausalen Folge von Ursache und Wirkung staunend das Wirken Gottes erkennen. Wie kann er das, wo doch die kausalen Ursachen mehr und mehr bekannt werden? Es ist das Wiedererkennen eines Musters, das er im Hier und Jetzt, in seinem persönlichen Leben, zu erkennen gelernt hat. Nur dank vorhandener Muster kann ein Mensch im Entstehen von Neuem das sehen, was mit dem biblischen Begriff Schöpfung gemeint ist: Der Vernunftgrund warum etwas entstand und nicht nichts. Diese Muster sind jedoch nur auf der Ebene der teilnehmenden Wahrnehmungen zu erkennen, so im Staunen oder in mystischen Visionen. Ohne teilnehmende Wahrnehmungen bliebe der Gottesbegriff ein abstraktes Prinzip. Der Weg kann nur über das menschliche Bewusstsein gehen und nicht von der Naturwissenschaft direkt zu religiösen Antworten führen.

Aus den beiden Wurzeln der Erfahrung bilden sich entsprechend zwei Arten von Sprache, Methode und Wissen:

1. Das Wissen aus den Erfahrungen der Naturwissenschaft ist praktisch anwendbar, da es überall und immer gilt. Die strenge Sprache der mathematischen Gleichungen ist unpersönlich und objektiv. Die Natur und ihre Objekte werden damit in einem gewissen Grad voraussagbar und technisch verfügbar. Das Verfügungswissen der Naturwissenschaft hat in den

vergangenen vierhundert Jahren das Leben der Menschen und das Antlitz des Planeten gründlich verändert, was seine guten und schlechten Seiten hat. Das naturwissenschaftliche Wissen erlaubt auch, Kausalketten zurückzuverfolgen und das Entstehen von Neuem in diesem Rahmen zu verstehen.

2. Die religiösen Erfahrungen schliessen den Menschen und seine Existenz ein. Dadurch ist die Sicht weiter als in der Naturwissenschaft. Sie erlaubt auch Orientierung im Ganzen des Kosmos, was Fragen nach dem Sinn, nach der Bedeutung des Menschen und der Ethik einschliesst. Die religiöse Sprache hat notwendigerweise bildhafte Elemente. Das Orientierungswissen der Religion ist auch ein Wissen um die Zukunft und kann Hoffnung vermitteln. Religiöse Wahrnehmungen sind allgemein menschlich, aber nicht reproduzierbar. Weil eine subjektive Komponente bei der Wahrnehmung notwendig dabei ist, kann das Wissen der Theologie nicht zwingend und nicht allgemein konsensfähig sein.

Es geht hier nicht um eine erzwungene Trennung von Naturwissenschaft und Religion, denn sie sind von ihren verschiedenen Ursprüngen her bereits getrennt. Vielmehr ist es wichtig, zwischen den beiden Wahrnehmungsarten zu vermitteln. Denn auch heute suchen sich Menschen zu orientieren anhand solcher direkten, eindringlicher Begegnungen mit der Welt und ihrem Schöpfer, wie sie Pascal schildert. Orientierung ist nötig, weil wir nicht nur wissen möchten, woher wir kommen und wie wir entstanden sind. Es stellen sich auch Fragen ein, welche nicht zur Naturwissenschaft gehören, weil sie den Menschen in seiner Existenz betreffen. Wie kann ich mich in diesem dynamischen Universum zurecht finden? Was bedeutet meine eigene, vorübergehende Existenz? Die Fragen sind nicht neu, aber sie erscheinen in einem neuen Licht. Um diesen Fragen nachzugehen, müssen wir uns im folgenden Kapitel überlegen, was naturwissenschaftliche Interpretationen bedeuten.

5. Hermeneutik der Naturwissenschaft

Ich möchte im Folgenden drei Arten von "Interpretieren" unterscheiden: Erstens was die naturwissenschaftliche Methode seit Beginn der Neuzeit beinhaltet und erfolgreich macht (*erklären* und *modellieren*), was zweitens Naturwissenschaftler miteinander diskutieren aber nicht in Fachzeitschriften publizieren (*verstehen*) und

worüber sie sich drittens bei einem Glas Wein abends am Cheminée mit Freunden unterhalten oder in populärwissenschaftlichen Büchern schreiben (*deuten*).

Erklären

Aus den Ausführungen zur Sternentstehung geht hervor, dass Erklären heisst, einen kausalen Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung herzustellen und ihn mathematisch mit einer Gleichung quantitativ auszudrücken. Ein eindeutiger Zusammenhang besteht nicht immer. Gegenbeispiele sind erstens der Zufall in der Quantenmechanik. Weil die Wirklichkeit erst bei der Messung real wird, erscheint sie uns in diesem Moment zufällig. Zweitens werden nicht-lineare Phänomene zwar durch deterministische Gleichungen beschrieben, ihre Lösungen hängen aber stark von den Rand- und Anfangsbedingungen ab. Der kausale Zusammenhang ist nicht über beliebig lange Zeit bestimmbar.

Was bedeutet es ein Phänomen zu erklären? In naturwissenschaftlichen Erklärungen ist Folgendes zu beachten:

1. Bei komplexen Phänomenen sind oft mehrere Erklärungen möglich.
2. Jede Erklärung ist möglicherweise falsch und muss getestet werden.
3. Es gibt unendlich viele Tests. Da nicht alle durchführbar sind, bleibt immer eine gewisse Unsicherheit bestehen.
4. Es gibt einen Trend zur Konvergenz bei verschiedenen Erklärungen und Modellen. Erklärungen können durch Beobachtungen widerlegt werden, sterben aber oft erst dann aus, wenn auch ihr Erfinder stirbt. Man kann Erklärungen ändern, kombinieren und ergänzen.

Es gibt zuverlässig erklärte Phänomene und weniger gut erklärte. Obwohl es einen gleitenden Übergang gibt, ist es nützlich zu differenzieren. In der Astrophysik gilt folgende Sprachregelung: *Gut erklärt* ist ein Phänomen, wenn es einen allgemeinen Konsens gibt. Es herrscht zwar nie Einstimmigkeit, weil immer wieder neue Erklärungsmodelle erfunden und getestet werden können. Ein allgemeiner Konsens bedeutet nicht Wahrheit. Zum Beispiel hat sich die Äther-Theorie für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen nach vielen Jahrzehnten des Konsens als falsch herausgestellt. Das Widerlegen einer guten Erklärung ist

immer eine Sensation, denn gute Erklärungen sind im Allgemeinen durch ein Geflecht von vielen Beobachtungen und Zusammenhänge abgestützt.

Gilt ein Phänomen als *nicht erklärt*, heisst das nicht, dass keine Erklärung möglich wäre. Irgend eine vorläufige Hypothese gibt es immer. Nicht erklärt bedeutet, dass es mehrere kontroverse Erklärungen gibt oder die Erklärung noch nicht durch weitere Indizien erhärtet ist.

Verstehen

Beim kausalen Erklären geht es im Idealfall um einen einzelnen Prozess. Dann lässt sich die Abbildung in die Mathematik am leichtesten vollziehen. Reduktion ist angesagt aus methodischen Gründen. Wenn jedoch verschiedene Prozesse nacheinander oder miteinander ablaufen wie bei der Sternentstehung, möchte man die Einzelvorgänge in einem grösseren Zusammenhang *verstehen*. In Vorlesungen versuchen wir solche Zusammenhänge zu vermitteln. Auch in Übersichtsreferaten werden sie thematisiert. Das Beobachten und Erklären eines neuen Phänomens gilt in der Forschung mehr als das allgemeinere Verstehen. Das letztere kann nicht der Inhalt eines Forschungsartikels sein und wird in Fachzeitschriften nicht gerne gesehen, es sei denn in spezialisierten Übersichtsblättern, den "Annual Reviews".

Wir sind von einem einzelnen Phänomen (der Sternentstehung) ausgegangen und auf eine kausale Verflechtung mit dem ganzen Universum gestossen. Man könnte nun fragen: Gibt es einen Zusammenhang des Ganzen? Wie weit verstehen wir heute das Universum als Ganzes. Werden wir es eines Tages vollständig verstehen?

Die Zahl der "guten Erklärungen" mit allgemeinem Konsens in der Astrophysik hat seit dem Jahr 1900 von einigen Zehn (die heute noch gelten) auf einige Tausend zugenommen. Trotzdem sind die weissen Gebiete auf der Landkarte des Wissens nicht kleiner geworden. Selbst bei einem begrenzten Gebiet wie der Sternentstehung sind gleichzeitig mindestens ebenso viele neue Fragen aufgetaucht. Auch sind ganz neue Gebiete, wie die Sternentwicklung oder externe Galaxien hinzugekommen. Um Missverständnissen vorzubeugen, möchte ich festhalten, dass gewisse Teilprozesse im Universum gut erklärt und im Zusammenhang verstanden sind. Sie bestätigen sich in neuen Messungen immer stärker.

Deuten

Ich habe genügend Vorbehalte angebracht um nun etwas unbescheiden festhalten zu können, dass die Naturwissenschaften und gerade auch die Astronomie unvorstellbar erfolgreich im Erklären und Verstehen von kosmischen Vorgängen waren. Was wir heute wissen, war vor hundert Jahren unvorstellbar. Und es geht zweifellos so weiter im neuen Jahrhundert.

Dieser Erfolg ruft nach einer Deutung: Warum kann die Physik das Universum mathematisieren?

Was sagt dieser Wesenszug über das Universum als Ganzes aus?

Antworten auf diese Fragen sind *Deutungen*. Sie können keine kausalen Erklärungen sein, denn sie sind nicht mathematisch. Sie übersteigen den Bereich der Naturwissenschaften und betrachten sie aus einer Perspektive von ausserhalb. Deutungen geschehen auf einer anderen Ebene. Eine Ortsverschiebung aus dem Büro oder Labor ist angesagt, zum Beispiel ans Cheminée.

Naturwissenschaftliche Erklärungen sind Modelle, die einen Kausalzusammenhang oder Zufall postulieren. Im Gegensatz dazu verstehe ich unter Deuten einen Sinnzusammenhang zu erschliessen. Deuten ist eine Aussage im Blick auf ein Ganzes, das bedeutet eine finale Aussage.

Können wir das Universum deuten?

Man könnte einwenden: Das Universum brauche nicht gedeutet zu werden. Es handele sich nicht um praktischen Fragen, die sich mit der naturwissenschaftlichen Methode beantworten lassen. Die Fragen sind zwar für die Physik nicht relevant, berühren aber die menschliche Existenz. Es geht um nichts weniger als den Grund, warum ich hier bin. In die Frage nach meiner Existenz, spielt die Frage nach der Deutung des Universums hinein: Was ist mein Platz im Universum?

Grenzüberschreitenden Fragen stellen nun aber auch Naturwissenschaftler. Auch sie wagen immer wieder Deutungen oder lassen sich dazu verleiten. Die Deutungen werden nicht in wissenschaftlichen Fachzeitschriften publiziert, wenigstens nicht in solchen, die diesen Namen verdienen, aber sie tauchen in populärwissenschaftlichen Büchern auf. So hat zum Beispiel Steven Weinberg in seinem populären Buch “Die ersten drei Minuten” geschrieben: “Je begreiflicher uns das Universum wird, um so sinnloser erscheint es auch.”

Das muss so sein, wenn begreifen kausal erklären und verstehen heisst. Wie gesehen bedeutet das naturwissenschaftliche Verstehen das Abbilden der Wirklichkeit auf mathematische Gleichungen. Dieser Vorgang für sich allein ergibt noch keinen Sinn, denn die Mathematik kann ihn nicht liefern. Wie sollte dies auch geschehen?

Etwas bedenklicher wird Weingergs Satz, wenn wir ihn so verstehen, dass kausale Erklärungen vergessen machen können, dass diese Abbildung eigentlich etwas Staunenswertes ist. Wir können beim naturwissenschaftlichen Verstehen vergessen uns zu wundern und nach dem Ganzen zu fragen, in das ein Einzelphänomen eingebettet ist. Erst das Ganze, und die Bedeutung, die das Einzelne im Ganzen hat, geben ihm einen Sinn.

Weinberg bemerkte später einmal, dass er nie so oft zitiert wurde wie an dieser Stelle. Er betonte auch, dass er nicht sagen wollte, das Universum hätte keinen Sinn. Genauso haben ihn aber viele verstanden. Auch wenn das Weinberg nicht so gemeint hat, ist die Aussage “das Universum ist sinnlos” eine denkbare Interpretation, die darin besteht, dass man die Möglichkeit einer Deutung verneint. Wenn das Universum von uns Menschen nicht gedeutet werden kann, wird auch die Frage nach dem Sinn müssig.

Viele mögliche Deutungen

Nehmen wir als klassisches Beispiel das Paradigma der Aufklärung: Das Universum ist ein *Uhrwerk*. In dieser Deutung wird ein Teilaspekt der Wirklichkeit, die Zahnräder des aufkommenden Maschinenzeitalters, auf das Ganze übertragen. Die Zahnräder sind das Musterbeispiel, das im Universum, insbesondere im Kreisen der Planeten, wieder gefunden wurde. Die Uhr wurde zur Metapher für das kausale Wirken im Allgemeinen. In dieser Übertragung auf das Ganze wird das Universum gedeutet. Die Deutung als Uhrwerk besagt einerseits, dass das Universum (inklusive der Mensch) aus einer Menge kausal erklärbarer

Bestandteile bestehe. Andererseits gibt sie jedem Bestandteil auch einen Wert und einen Sinn. Ohne die einzelnen Bestandteile würde das Uhrwerk nämlich nicht funktionieren.

In der Deutung stecken immer auch Vorurteile, die nicht durchdacht sind. Das Entstehen der Sterne, erinnert nicht an ein Uhrwerk. Sie ist ein stark nicht-lineares Phänomen, bei dem viele Teile aufeinander einwirken und eine genaue Voraussage verunmöglichen wie beim Wetter auf der Erde. Das chaotische Verhalten solcher Systeme war im 18. Jahrhundert noch nicht bekannt. Auch die quantenmechanische Unschärfe und Zufälle passen schlecht ins Bild einer Uhr. Sterne entstanden nicht am Anfang. Ihre heutige Art ist das Resultat des Zerfalls früherer Sterne. Das Neue entwickelt sich nicht aus dem Nichts, vielmehr enthält es das Alte. Die meisten neuen Strukturen und Objekte im Universum haben etwas Überraschendes an sich und wären kaum voraussagbar gewesen, wenn es damals schon Menschen und Prognosendienste gegeben hätte. Die Uhrwerk-Deutung ist angesichts der heutigen Naturwissenschaft nicht mehr angebracht.

Wir begegnen auch heute noch der Deutung, dass das Universum *rational* sei. Dies ist allgemeiner und meint, dass es einen Plan gibt, der die Entwicklung des Universums nach kausalen Gesetzen steuert. Als Bild dient nicht mehr ein mechanisches Uhrwerk, vielmehr der rational denkende Mensch, zum Beispiel der Plan eines Ingenieurs, der einen Supercomputer entwirft. Diese Deutung schliesst unter anderem einen Gott aus, der eigenständig eingreift. Er wird dann allenfalls noch als "Grosser Designer" gedacht. Zufälle müssen allerdings akzeptiert werden. Sie spielen in der biologischen Evolution bekanntlich eine wichtige Rolle. Überdies ist darauf zu bestehen, dass Rationalität eine Grundannahme der Naturwissenschaft ist, keine Deutung. Diese Annahme ist ein Teil der Methode und definiert den Gültigkeitsbereich der Naturwissenschaft. Zur Deutung wird die Rationalität erst wenn sie als ausschliesslich postuliert wird. Diese ausschliesslich rationale Deutung hat eine gewisse Akzeptanz gefunden unter den Naturwissenschaftlern, ist aber auch da nicht allgemeiner Konsens. In der Belletristik wird die Rationalität oft verlassen, denn menschliche Existenz Erfahrungen sind oft nicht rational.

Es ist daher auch die Deutung möglich, dass die Wirklichkeit grösser sei als der rationale Bereich der Naturwissenschaften, und das Universum letztlich *irrational* sei. Dies würde bedeuten, dass nicht alles mathematisierbar ist und immer etwas Geheimnisvolles bestehen bleibt. Eine solche Aussage mag ungute Gefühle wecken, denn sie kann misbraucht werden,

um auch Esoterik und Okkultismus zu rechtfertigen. Das muss aber nicht so sein, wie der souveräne Umgang mit Irrationalität in der Dichtkunst eindrücklich belegt.

Eine Variante der Irrationalität schliesslich ist die Deutung, dass das Universum in eine absolute, umgreifende Wirklichkeit eingebettet sei. Ich spreche hier von der transzendenten Begründung und der Deutung des Universums als *Schöpfung*. Sie weiter unten etwas ausführlicher diskutiert.

Hermeneutik der Natur?

Ich beobachte, wie immer wieder versucht wird, die Natur zu deuten, auch durch Naturwissenschaftler. Beispiele von solchen Deutungen wurden erwähnt. Nicht immer werden Deutungen bewusst gemacht und reflektiert. Oft geschieht eine Deutung nur intuitiv und wird nicht als solche erkannt und benannt. Deutungen können sich auch in Form einer allgemein gebrauchten Metapher einschleichen und verbreiten.

Es soll Naturwissenschaftlern nicht verboten sein zu deuten, ist es doch ein legitimes Unterfangen, "das Verborgene durch Einsicht zu erschliessen". Richard Feynman sagte einmal:

"Weil wir etwas nicht messen können, ist es trotzdem erlaubt darüber zu sprechen. Aber wir müssen es nicht. Ein Konzept oder eine Idee, auch wenn nicht beobachtbar oder messbar oder mit einem Experiment in Verbindung zu bringen, kann brauchbar sein, aber muss es nicht."

Gewiss gibt es eine Vielzahl von möglichen Deutungen. Everything goes. Deutungen haben allerdings Einfluss auf unser Verhalten und unsere Einstellung zum Leben. Vielleicht gilt auch hier: Wer schlecht deutet, den bestraft das Leben.

Wie deutet man angemessen? Auch in der Deutung des Universums sollten wir uns kritisch und selbstkritisch fragen, was denn die Bedingungen sind für eine Deutung. Statt vorschnell zu deuten, muss zuerst nach den Präliminarien gefragt werden: Wie kann eine Deutung überhaupt gelingen? Was muss sie leisten können? Wovon gehen wir aus?

Ein guter Ansatz ist es, vor der Deutung die Substanz freizulegen, damit sie wie für sich selber spricht. Eine Deutung der Natur müsste heute Folgendes einschliessen:

1. Die physikalisch erfassbare Wirklichkeit lässt sich auf Mathematik abbilden.
2. Wenige physikalische Grundgesetze bilden die Basis aller astronomischen Vorgänge im Universum.
3. Sie erlauben die Entwicklung zu unvorstellbarer Komplexität.
4. Die physikalische Seite der kosmischen Entwicklung verstehen wir zum Teil. Sie verläuft kausal nach bekannten Gesetzen oder zufällig nach berechenbarer Wahrscheinlichkeit.
5. In gewissen Entwicklungen, insbesondere in der Biologie überwiegen anscheinend die Zufallsprozesse.
6. Wir wissen nicht, wie gross der Anteil an der Wirklichkeit ist, den wir gut erklären und modellieren können.
7. Rätsel wird es immer geben und Geheimnisse werden bleiben.
8. Die Entwicklung von komplexen Systemen geschieht innerhalb eines Rahmens, der durch die Erhaltungsgesetze gegeben ist. Innerhalb dieses Rahmens ist die zukünftige Entwicklung offen.

Eine solche Ausgangslage kommt nahe an die existentiellen menschlichen Erfahrungen heran und ihre Deutungen in aktuellen psychologischen und theologischen Entwürfen.

6. Das Universum als Schöpfung deuten

Biblische Schöpfungsgeschichten

Der Ausgangspunkt religiöser Schöpfungsvorstellungen ist nicht die naturwissenschaftlich vorgegebene Wirklichkeit, sondern andere Erfahrungen. Es sind existentielle Wahrnehmungen in Alltag, Geschichte und Mystik und sind oft mit Staunen verbunden. Sie führen zu Erfahrungen von Sinn, Ordnung und Orientierung. Das Besondere an ihnen ist, dass sie nicht mathematisierbar und objektivierbar sind. Damit stehen sie ausserhalb des naturwissenschaftlichen Erfahrungsbereichs. Sie sind nur in Bildern zu vermitteln, wie wir sie eben in Schöpfungsgeschichten finden.

Was können nun biblische Schöpfungsgeschichten beitragen zur Deutung des Universums? Traditionell stehen in unsrer Kultur die Schöpfungsgeschichten nach

Genesis 1 und 2 im Vordergrund. Zentral an Genesis 1 und 2 ist die Aussage, dass das Universum in eine Transzendenz eingebettet ist. Diese hat das Universum gewollt und damit hat das Universum eine globale Einheit und einen Sinn. Diese Tiefendimension des Universums ist eine Deutung, ausgehend von individuellen Gotteserfahrungen. Die Schöpfungsgeschichten illustrieren die Existenz des Einzelnen aus der Perspektive des Ganzen und geben ihm einen Wert und Platz im Universum.

Das „Neue“ ist kein naturwissenschaftlicher Begriff. Schöpfung ist nur in der Teilnahme am Neuen zu erfahren. Die Neues schaffende Kraft wird auf der existentiellen Erfahrungsebene wahrgenommen, wo der Mensch an der Wahrnehmung teilnimmt. Im Prolog des Johannes (Joh. 1,1 – 18) wird diese Erfahrung zur Metapher für die Ebene der physischen Welt. Die Kraft, die in Jesus wahrgenommen wurde, schafft Neues auch im ganzen Universum. Teilnehmende Erfahrungen im Leben der frühen Christen werden auf die „objektive“ Welt des Kosmos übertragen. Später hat sich dafür der Begriff vom kosmischen Christus etabliert. In dieser Übertragung wird das Universum als Schöpfung gedeutet und zugleich erklärt, was Schöpfung bedeutet: Schöpfung ist wie Auferstehung. Die Ostergeschichte wurde zum Kern des christlichen Schöpfungsglaubens.

Auch heute muss der Schöpfungsglaube im modernen Weltbild neu formuliert werden, um verstanden zu werden. Was bedeutet es zum Beispiel konkret, Gott (oder der Logos) habe die Sterne erschaffen?

Das Prinzip des Werdens

Was wir wissen von den kausalen Abläufen der Sternentstehung, habe ich am Anfang skizziert. Die physikalischen Vorgänge können mit Teleskopen beobachtet und die relevanten Parameter gemessen werden. Modellrechnungen machen Erklärungen plausibel und regen zu bestätigenden oder weiterführenden Beobachtungen an. Auch wenn wir noch nicht alles wissen und nie alles verstehen werden, liegt dieser Bereich der Sternforschung ganz im Gebiet der exakten Naturwissenschaft. Der objektivierende Ansatz dieser Wissenschaft schliesst das

Subjekt und die Fragen nach seiner Existenz aus. Auch die Frage nach einer Transzendenz kommt nicht ins Blickfeld.

Jeder neugierige Mensch stellt sich aber irgendwann die Frage, was denn hinter allem stecke: Wie ist es überhaupt möglich, dass eine dermassen komplexe Entwicklung bis hin zum menschlichen Bewusstsein abgelaufen ist, ja dass überhaupt etwas völlig Neues entstehen kann? Warum ist unser Universum so beschaffen, dass darin etwas geworden ist und nicht nichts? Wie kommt es zu diesen ganz speziellen, genau richtigen Umständen, unter denen Sterne entstehen?

In diesen Fragen geht es um die Frage nach dem Vernunftsprung¹⁵ im Gegensatz zum kausal-zeitlichen Ursprung, den die Astrophysik erforscht. Im Universum gibt es offensichtlich ganz allgemein die Möglichkeit, dass Neues entstehen kann. Ein „Prinzip des Werdens“ existiert, eine Grundeigenschaft, die sich auch in der Chemie, Biologie, bis hin zur menschlichen Gesellschaft zeigt. Dass wir und alle Dinge geworden sind, ist unbestreitbar. Zum Werden gehört auch das Vergehen, der Zerfall. Das Universum ist aber nicht im Gleichgewicht eines ewigen Kreislaufes, denn das Neue ist anders als das Gewesene. Die Entwicklung in den vergangenen 13,7 Milliarden Jahren seit dem Urknall ist nicht zu übersehen. Heutige Sterne sind anders als frühere. Es gab auch eine qualitative Entwicklung: Einer der vielen Sterne war der erste. Seine Überreste tauchen wieder auf in der nächsten Sternengeneration und im Novum „Planet“. Auch wenn sich im menschlichen Körper vielerlei Verbrennungsprodukte aus erloschenen Sternen finden lassen wie Kohlenstoff und Sauerstoff, ist der Mensch doch etwas unerwartet Neues.

Über das Prinzip des Werdens könnten nun ähnliche Überlegungen angestellt werden, wie es griechische Philosophen im 5. Jahrhundert v. Chr. über den „Seinsgrund“ taten. Sie meinten damit eine metaphysische Grösse im Zusammenhang mit der Frage, warum etwas ist und nicht nichts. Das Weltbild hat sich inzwischen gewandelt vom statischen Sein zu einem dynamischen Werden. Daher müssten wir entsprechend nach einem „Grund des Werdens“ fragen. Ich möchte betonen, dass dieser Begriff einer philosophischen Überlegung entstammt und nicht vorschnell mit „Gott“ gleichgesetzt werden soll.

Schöpfungsgeschichten als Symbolsprache

Wird das naturwissenschaftlich Vorfindliche aufgrund religiöser Erfahrungen gedeutet, erscheinen naturwissenschaftliche Fakten aus einer anderen Perspektive und in einem neuen Licht. Im diesem Deuten werden sie bewertet und interpretiert. Teilnehmende Wahrnehmungen, wie sie im Musterbeispiel der Auferstehung überliefert werden, geben einem Menschen das Muster, um für sich die Welt als Schöpfung zu erkennen und von Gott als dem Schöpfer zu sprechen. Ostern ist im frühen Christentum zu einem Musterbeispiel existentieller Wirklichkeitserfahrung geworden. Ein Beispiel dafür, dass Katastrophen nicht das Ende sein müssen, wenngleich sie es oft sind. Gott kann etwas Neues schaffen. Dies gibt Anlass zu Hoffnung. Hoffnung auf Neues ist eines von mehreren Deutungsmustern betreffend der Zukunft des Universums. Entscheiden wir uns für dieses Muster im christlichen Glauben, so wird die bisherige Entwicklung des Universums zum Bild für die Zukunft.

Der christliche Schöpfungsglaube vermittelt Hoffnung. Hoffnung für die Zukunft haben, kann heissen, auf etwas Neues zu setzen, auf etwas, das es jetzt noch nicht gibt oder nur in Anzeichen sichtbar ist. Hoffnung deutet auch die Zeichen der Zeit in der Erwartung von etwas Neuem. Gewiss, das kann Illusion sein, also eine billige Hoffnung, welche die Fakten verdrängt. Woher aber nehmen wir unsere Hoffnung? Die Naturwissenschaft bietet keine Hoffnung an, diesem Begriff begegnet man auch in der Astrophysik nicht¹⁶. Hoffnung gründet auf existentielle oder religiöse Erfahrungen von Vertrauenkönnen. Solche Wahrnehmungen sind nicht Teil der Naturwissenschaften.

Der Schöpfungsglaube muss sich weiter entwickeln. Wenn er kritisch bleibt, kann er die Resultate der modernen Naturwissenschaft integrieren, ohne seinen eigentlichen Inhalt preiszugeben. Kritisch heisst hier, die Gegebenheiten aufnehmen, wie sie aus den Naturwissenschaften resultieren. Die Deutungen, die oft auch mitgeliefert werden, sollen aber hinterfragt und allenfalls zurückgewiesen werden. Beispiele von solchen Deutungen gibt es viele: das Universum ein Uhrwerk, der Mensch eine Maschine, das Universum ist sinnlos usw. Neue naturwissenschaftliche Einsichten werden uns in diesem Jahrhundert immer wieder herausfordern. Der Schöpfungsglaube ist nur authentisch, wenn er sie aufnimmt, und wird

deshalb nie einen endgültigen Status erreichen. Mit dieser Offenheit wird er auch in Zukunft eine Quelle für Hoffnung bleiben.

Ethische Überlegungen

Wenn es nun um die kosmische Geschichte geht, ist der Mensch offensichtlich ein winziger Teil, was die räumlichen und zeitlichen Dimensionen betrifft. Wenn es um Komplexität von Systemen geht, verschwindet diese Unbedeutsamkeit immer mehr. Jedes Lebewesen erscheint uns komplexer als ein Stern. Die Komplexität, von der hier die Rede ist, meint die Vielzahl der signifikanten Wechselwirkungen der Elemente und damit die grosse Zahl der Gleichungen, die nötig wären, um das System zu beschreiben. Es ist eine wichtige Eigenschaft des Universums, dass solche Komplexität entstehen kann, auch wenn das immer lokal und räumlich sehr beschränkt sein wird. Weil wir die Entstehung des Lebens noch nicht genügend verstehen, ist es heute völlig unmöglich, Aussagen über seine Häufigkeit im Universum zu machen. Für die nachfolgenden ethischen Überlegungen müssen wir davon ausgehen, dass die biologische Evolution auf der Erde vielleicht nicht einmalig ist, aber nicht häufig im Universum soweit fortschreitet, bis ihrer sich selbst bewusste Lebewesen entstehen.

An der Entwicklung des irdischen Lebens hat heute der Mensch einen wesentlichen Teil. Der gegenwärtige Gang der Evolution wird bestimmt durch die Tatsache, dass heute 100 Tierarten pro Tag aussterben. Noch ist nicht abzusehen, wie gross der Einschnitt sein wird im Vergleich zu den früheren Katastrophen, die durch kosmische Ereignisse ausgelöst wurden. Es ist nicht auszuschliessen, dass das Leben im Universum selten ist und somit das heutige Artensterben auf der Erde ein bleibender Einschnitt in die Geschichte des Universums bedeutet.

Ethische Überlegungen können nicht direkt aus dem naturwissenschaftlich gegebenen Rahmen hergeleitet werden. Naturwissenschaftliche Überlegungen kommen aber zum Schluss, dass die Entwicklung des Lebens auf der Erde wenn auch mit Einbrüchen, noch über mindestens eine Milliarde Jahre weiter gehen kann. Der grösste Risikofaktor ist der Mensch. Eine Ethik im Weltbild der kosmischen

Entwicklung müsste sich daran orientieren, dass die Entwicklung, die über die vergangenen 4 Milliarden Jahre voran geschritten ist, nicht plötzlich abbrechen soll. Unser Handeln darf nicht von kurzfristigem Interesse der menschlichen Spezies geleitet sein. Es muss eine neue „Ehrfurcht vor der Entwicklung“¹⁷ entstehen.

Unter Entwicklung soll man sich keineswegs nur die biologische Evolution vorstellen. Die Entwicklung hat sich seit langem auf geistige und kulturelle Werte ausgeweitet. Gerade in der Entwicklung der menschlichen Gesellschaften zeigen sich die grössten Veränderungen in den letzten zehntausend Jahren. Die verschiedenen Kulturen wachsen immer mehr zusammen, getrieben von der globalen technischen Zivilisation und ihrem ungestümen Fortschritt. Die menschliche Kultur lässt sich auch immer weniger von der Natur abgrenzen, denn unsere Zivilisation steht in einem engem Verhältnis zur Umwelt und schliesst sie mehr und mehr ein. Dank engagierten Fürsprechern hat andererseits der verantwortliche Umgang mit den natürlichen Ressourcen bereits erstaunlich viel Akzeptanz gewonnen. Trotz dem manchmal entmutigenden Wettrennen gegen Auswüchse der technischen Entwicklung hat der Umweltschutz auch etliche Erfolge zu verbuchen. Auch dies sind Entwicklungen.

Hoffnung trotz Zerfall?

Die „Ethik der Entwicklung“ steht aber auf schwachen Füßen, wenn letztlich doch alles zerfällt. Was ändert es, ob die Entwicklung nur einige hundert oder noch einige Milliarden Jahre weitergeht? Den Status quo können wir nicht für immer erhalten. Es bleibt dabei, dass die Erde langfristig unbewohnbar wird und damit das Leben in der heutigen Form ausgelöscht wird. Wird sich dann etwas Neues bilden? Es besteht eine merkwürdige Asymmetrie zwischen dem Zerfall aller Dinge im Universum, den wir zum Teil genau vorausberechnen können, und dem Entstehen von Neuem, das nicht prognostizierbar ist.

Zum ethischen Handeln braucht es Hoffnung, selbst wenn es nicht um Jahrmillionen geht. Hoffnung für die Zukunft haben in einem sich entwickelnden Universum, wo alles auch wieder zerfallen wird, kann nur heissen, auf etwas Neues zu setzen, auf

etwas, das es vielleicht jetzt noch nicht gibt, oder nur in Anzeichen sichtbar ist. Hoffend deuten wir die Zeichen der Zeit in der Erwartung von etwas Neuem. Gewiss, das kann auch Illusion sein, also eine billige Hoffnung, welche die Fakten verdrängt. Hoffnung muss aber nicht billig sein. Woher nehmen wir die rechte Hoffnung?

Die Naturwissenschaft bietet keine Hoffnung an, diesem Begriff begegnet man in der Astrophysik nicht, denn diesbezügliche Erfahrungen sind nicht Teil der Naturwissenschaften. Hoffnung gründet auf Erfahrungen des Vertrauens. Die Hoffnung ist eines der möglichen Grundmuster, mit denen man die Gegenwart deuten kann. Deuten heisst, in der existentiellen Wirklichkeit ein Muster wieder erkennen, das aus einem früheren Ereignis bekannt ist, das sogenannte Musterbeispiel. Hoffnung, in der selbst der Zerfall und der Tod nicht das letzte Wort haben, ist die zentrale Botschaft des Christentums an die Welt. Das Musterbeispiel ist die Geschichte von Karfreitag und Ostern.

Hoffnung auf Neues ist eines von mehreren Deutungsmustern. Entscheiden wir uns für dieses Muster, so wird die bisherige Entwicklung des Universums zum Bild für die Zukunft. Noch mehr: Im Deuten bewerten wir das naturwissenschaftlich Vorfindliche und interpretieren es aufgrund anderer Erfahrungen, die nicht aus naturwissenschaftlichen Messungen und Beobachtungen stammen. Die naturwissenschaftlichen Fakten erscheinen in einem neuen Licht und unter einer bestimmten Perspektive. In religiöser Sprache: Der Schöpfer der Welt wird auch die Zukunft erschaffen. Selbst wenn alles zerfällt, wird seine Gnade bleiben. Ich kenne keine andere Sprache, welche die tiefsinnige Symbolik besitzt, diese existentiellen Grunderfahrungen besser auszudrücken.

¹ In seinem ersten Brief an R. Bentley schrieb Isaak Newton 1692: „Die Materie ausserhalb eines Raumes würde wegen ihrer Schwerkraft von der Materie im Innern gezogen und daher zur Mitte fallen und dort eine grosse kugelförmige Masse bilden. Ist nun aber die Materie gleichmässig im unendlichen Raum verteilt, würde sie nie zu einer einzigen Masse sich vereinen, sondern eine unendliche Zahl von Massen bilden, die über grosse Distanzen verstreut sind im unendlichen Raum. Und so könnten die Sonne und Sterne entstanden sein, angenommen die Materie sei von leuchtender Natur.“

² Immanuel Kant, Allgemeine Naturgeschichte, Versuch von der Verfassung und dem mechanischen Ursprunge des ganzen Weltgebäudes nach Newtonischen Grundsätzen, Vorkritische Schriften (1755)

³ Simon Pierre de Laplace, Exposition du système du monde, 1796.

⁴ Die Katastrophen-Hypothese zur Planetenentstehung wurde ursprünglich 1749 von Georges Louis Leclerc de Buffon vorgeschlagen, der einen grossen Kometen als Auslöser der Planetenentstehung vermutete. Die Kollisions-Hypothese blieb bis Mitte des letzten Jahrhunderts bestehen, als Hannes Alfvén die kosmische Bedeutung von Magnetfeldern entdeckte.

⁵ Schwarze Löcher sind Regionen im Universum mit immenser Materiedichte, deren grosse Schwerkraft genügt, alles zurückzuhalten. Selbst Photonen können nicht entweichen. Daher ist die Farbe schwarz. Objekte dieser Art befinden sich im Zentrum von Galaxien und haben Millionen bis Milliarden von Sonnenmassen. Kleinere Schwarze Löcher werden auch als Endstadium der Entwicklung von massereichen Sternen vorausgesagt und sind schon mit grosser Wahrscheinlichkeit nachgewiesen worden.

⁶ Francesca Bacciotti, Thomas P. Ray, Reinhard Mundt, Jochen Eisloffel und Josef Solf, Hubble Space Telescope/STIS Spectroscopy of the Optical Outflow from DG Tauri: Indications for Rotation in the Initial Jet Channel, *Astrophysical Journal* 576, Bd. 1, 222-231, 2002.

⁷ Michel Mayor und Didier Queloz, A Jupiter-Mass companion to a Solar-Type Star, *Nature* 378, 355-359, 1995.

⁸ Pascal Stäuber, Steven D. Doty, Ewine F. van Dishoeck, Jes K. Jørgensen, Arnold O. Benz, Water Destruction by X-rays in Young Stellar Objects, *Astronomy and Astrophysics*, im Druck, 2006.

⁹ Die kosmischen Entwicklungen werden vom Autor ausführlicher beschrieben in *Die Zukunft des Universums – Zufall, Chaos, Gott?*, Patmos Verlag, Düsseldorf, 4. Auflage, 2001. Teile dieses Artikels wurden in einem anderen Zusammenhang publiziert in *Die Welt als Schöpfung und als Natur*, Neukirchner Verlag, 2002.

¹⁰ Michel P., Farinella P. und Froeschlé C., *Astron. Journal* 116, 2023 (1998)

¹¹ Genzel R., Eckhart A., Ott T., Eisenhauer F., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.*, 291, 219 (1997)

¹² Dyson Freeman J., *Rev. Modern Physics* 51, 447 (1979)

¹³ Blaise Pascal, Gedanken, deutsche Übersetzung von E. Wasmuth, Reclam: Stuttgart, S.14, 1956

¹⁴ J. Fischer, *Freiburger Zeitschrift für Philosophie und Theologie* 41, S. 491, 1994

¹⁵ Mit Vernunftursprung ist die Bedingung der Möglichkeit, z.B. von Sternentstehung, gemeint.

¹⁶ Über Naturwissenschaft und Hoffnung siehe auch Arnold Benz, *Die Zukunft des Universums*, Patmos: Düsseldorf, 5. Auflage 2005.

¹⁷ In Erweiterung der bekannten ethischen Maxime von Albert Schweitzer auf den ganzen Kosmos, inkl. der unbelebten Materie.