

>Bentō

Natur**wissenschaft**
Technik
Gesell**schaft**



mit Jörg-Martin Batke

Audioskripten

Jörg-Martin Batke

© Jörg-Martin Batke 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen, schriftlichen Zustimmung des Autors. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen sowie für Aufführung und Sendung.

Die Wiedergabe der Namen von Institutionen und Unternehmen, Marken und allgemein beschreibenden Bezeichnungen in diesem Werk erfolgt ausschließlich zu informationellen Zwecken und bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Gestaltung des Podcast-Covers:

Jörg-Martin Batke. Unter Einhaltung der jeweils geltenden, lizenzrechtlichen Bestimmungen wurde Bildmaterial von NASA® und Pixabay® verwendet.

Inhaltsverzeichnis

We choose to go to the moon. Again.

4

Amerika will wieder zum Mond. Denn es hat einen neuen Gegner: China.
Eine Einordnung. [12. Juli 2023]

Euclid. Fragen an die Geometrie des Raumes.

9

Das Weltraumteleskop Euclid hat Großes vor. Es soll die bislang umfangreichste und detaillierteste 3-dimensionale Karte des Universums erstellen. Und so dabei helfen, den Schleier zu lüften, der Dunkle Materie und Dunkle Energie umgibt. [10. August 2023]

Welt der Quanten. An die Grenzen unserer Vorstellungskraft.

13

Quanten sind die Basiseinheiten des Universums. Alles scheint aus ihnen aufgebaut: Materie, Felder, sogar Raum und Zeit. Doch obwohl wir alles auf sie zurückführen, scheitern wir an einer geschlossenen Beschreibung dessen, was sie sind. [16. September 2023]

Unendliche Weiten. Die Kunst kosmischer Entfernungsmessung.

19

Wie weit sind beobachtete Sterne und Galaxien von uns entfernt? Wie weit blicken wir dabei in die Vergangenheit? Und wie verändern sich die kosmischen Distanzen im Laufe der Zeit? Voraussetzung dafür, dass Astronomen diese Fragen beantworten können, ist eine verlässliche Bestimmung der Entfernungen im All. [18. Oktober 2023]

Mensch macht Klima. Klima macht Mensch.

24

Der Mensch entlässt große Mengen an Treibhausgasen in die Atmosphäre, die globale Durchschnittstemperatur steigt. Doch menschliches Handeln beginnt bereits lange vor der industriellen Revolution, sich auf das Gleichgewicht auf unserem Planeten auszuwirken. [01. Dezember 2023]

We choose to go to the moon. Again.

Amerika will wieder zum Mond. Denn es hat einen neuen Gegner: China. Eine Einordnung.

O-Ton 1

[Redeausschnitt, John F. Kennedy am 12. September 1962 an der Rice University in Houston, Texas]

“We choose to go to the moon. We choose to go to the moon in this decade and do the other things, not because they are easy, but because they are hard, because that goal will serve to organize and measure the best of our energies and skills, because that challenge is one that we are willing to accept, one we are unwilling to postpone, and one which we intend to win.”

Übersetzung O-Ton 1

„Wir werden noch in diesem Jahrzehnt zum Mond fliegen, nicht, weil es leicht wäre, sondern, weil es eine Herausforderung ist. Weil dieses Ziel dazu dienen wird, das Beste an Energie und Fähigkeiten zu mobilisieren, das wir haben. Wir sind bereit, diese Herausforderung anzunehmen, und wir beabsichtigen, zu gewinnen.“

John F. Kennedy am 12. September 1962 an der Rice University in Houston, Texas.

Jingle

[Schluss leiser und mischen mit]

Ihr hört Bento. Naturwissenschaft, Technik, Gesellschaft. Ich bin Jörg-Martin Batke.

Schaffung einer emotionalen Basis

Die Rede des damaligen US-Präsidenten Kennedy an jenem Tag im September 1962 war ein leidenschaftliches Plädoyer für das Apollo-Programm. Jenes Programm der NASA also, das zum Ziel hatte, Menschen auf den Mond zu bringen. Kennedy wollte seine Mitbürger auf einer emotionalen Ebene ansprechen, denn dieses Projekt würde nicht nur technologisch in vielen Bereichen Neuland betreten, es würde den Einsatz finanzieller und wirtschaftlicher Ressourcen in einem bislang kaum gekannten Umfang erfordern. Das Apollo-Programm kostete in den Jahren zwischen 1961 und 72 rund 23,9 Milliarden Dollar. Nach heutigen Maßstäben, Stand 2023, wären das rund 150 Milliarden Dollar. Eine breite, gesellschaftliche Unterstützung war daher unabdingbare Voraussetzung für dieses Vorhaben.

Der Gegner

Der Gegenspieler der Vereinigten Staaten in diesem Wettlauf zum Mond war die damalige Sowjetunion. Und damit war dies nicht bloß ein Kräfteressen auf technologischer Ebene. Es war ein Wettstreit der Systeme. Demokratie und Freiheit auf der einen Seite, Kommunismus und Totalitarismus auf der anderen. Amerika durfte nicht hinter den Sowjets zurückbleiben. Noch einmal Präsident Kennedy:

O-Ton 2

[Redeausschnitt, John F. Kennedy am 12. September 1962 an der Rice University in Houston, Texas]

„Our leadership in science and in industry, our hopes for peace and security, our obligations to ourselves as well as others, all require us to make this effort, to solve these mysteries, to solve them for the good of all men, and to become the world's leading space-faring nation.“

Übersetzung O-Ton 2 / Interpretation

„Unsere führende Stellung in Wissenschaft und Wirtschaft, unser Bedürfnis nach Frieden und Sicherheit, unsere Verpflichtungen uns selbst und anderen gegenüber, all das gebietet uns, diese Mühen auf uns zu nehmen, diese Rätsel zu lösen, zum Wohle aller Menschen, und zur führenden Raumfahrernation zu werden.“

Aus amerikanischer Sicht ging es um nicht weniger als die Verteidigung und Sicherung der Grundwerte einer freiheitlichen Gesellschaftsordnung. Und die Vereinigten Staaten sahen sich aufgrund ihrer Möglichkeiten in der moralischen Pflicht, hierbei zum Wohle aller Menschen die Führungsrolle zu übernehmen.

Das Apollo-Programm

Am 20. Juli 1969 wurde Kennedys Vision Wirklichkeit. Um 20:17:40 Uhr koordinierter Weltzeit setzte die Landefähre „Eagle“ im Rahmen der Apollo 11 Mission auf der Mondoberfläche auf. Es war der Beginn der ersten von insgesamt 6 erfolgreichen Mondlandemissionen. Knapp dreieinhalb Jahre später, am 14. Dezember 1972 verließ mit der „Challenger“ von Apollo 17 die letzte Fähre den Mond. Seither hat den Erdtrabanten niemand mehr betreten.

Das russische Mondprogramm

Die Sowjets arbeiteten parallel zu den Amerikanern ebenfalls an einer Mondlandung, scheiterten jedoch vor allem daran, ein ausreichend leistungsfähiges Trägersystem bereitzustellen. Nach mehreren Fehlstarts der vorgesehenen Mondrakete in den Jahren 1969 bis 72 wurde das Projekt 1974 schließlich ganz eingestellt.

Das Ende des Apollo-Programms

Die Wissenschaft hat vom Apollo-Programm in vielen Bereichen profitiert, kein Zweifel. Bis heute liefern beispielsweise die Gesteinsproben vom Mond immer noch neue Erkenntnisse. Aber auch in den USA wuchs im Laufe der Zeit die Einsicht, dass die enormen finanziellen Belastungen durch das Apollo-Programm in keinem ausgewogenen Verhältnis mehr zu den daraus noch zu erzielenden strategischen Vorteilen standen. Insbesondere, da man den Sowjets ja nicht nur zuvorgekommen war, sondern sie gänzlich hinter sich gelassen hatte, wurde das Programm nach erfolgreichem Abschluss von Apollo 17 beendet.

Wieder auf den Mond?

Prima, könnte man jetzt sagen, „mission accomplished“, Häkchen drunter, wenden wir uns neuen Zielen zu. Und da erstaunt es umso mehr, das Ziel, Menschen auf den Mond zu bringen, mehr als 50 Jahre später erneut auf der Agenda der NASA zu finden. Unbemannte Missionen lassen sich erheblich kostengünstiger realisieren als bemannte. Und die seit den 1970-er Jahren erzielten Fortschritte in den Bereichen Robotik, Sensorik, mobiler Analytik und künstlicher Intelligenz machen die körperliche Anwesenheit von Menschen auf dem Mond oder gar noch weiter entfernten Himmelskörpern wie dem Mars eigentlich entbehrlich. Was also hat sich seit dem Ende des Apollo-Programms geändert?

Eine Parallele

Nun, es gibt eine wichtige Parallele zwischen den 60-er Jahren des vergangenen Jahrhunderts und heute. Die USA sehen sich wieder in Konkurrenz mit einer anderen Nation, die nicht nur wirtschaftlich bedrohlich erstarkt ist, sondern auch ein Gesellschaftsmodell repräsentiert, das den freiheitlichen Grundwerten Amerikas entgegensteht. Was im vergangenen Jahrhundert die Sowjetunion war, ist heute China. Und China hat, als jüngste unter den raumfahrenden Nationen, eine Mondlandemission bis 2030 angekündigt. Tatsächlich kann Chinas bemanntes Raumfahrtprogramm inzwischen auf eine ganze Reihe beachtenswerter Erfolge verweisen.

Die chinesische bemannte Raumfahrt

Nach 11 Jahren Planung und Entwicklung hob am 15. Oktober 2003 der Chinese Yang Liwei mit dem Raumschiff Shenzhou 5 zum ersten bemannten Raumflug in Chinas Geschichte ab. Er umkreiste die Erde 14-mal und landete nach gut 21 Stunden wieder sicher in der Inneren Mongolei.

Fünf Jahre später, am 27. September 2008, folgte im Rahmen der Mission Shenzhou 7 der erste Weltraumausstieg. Zhai Zhigang absolvierte dabei einen 14-minütigen Aufenthalt außerhalb des Raumschiffs. Ein zweiter Taikonaut unterstützte ihn aus der Ausstiegsluke heraus, ohne diese jedoch zu verlassen.

Mit Tiangong 1 hob am 29. September 2011 das erste chinesische Weltraumlabor ab. Es war 10,40 Meter lang und wog 8,5 Tonnen. Primäres Ziel, das mit Tiangong 1 verfolgt wurde, war die Technologieerprobung für die geplante Raumstation. Auf chinesischer Seite wurde daher auch nicht von einem Raumlabor, sondern von einem Zielflugkörper gesprochen. Getestet wurden insbesondere das Lebenserhaltungssystem, die Momentenkreisel zur Lageregelung, Navigations-, Rendezvous- und Kopplungstechnik sowie das Verhalten des gekoppelten Systems aus Raumlabor und Raumschiff. Nach 6,5 Jahren im All trat es Anfang April 2018 wieder in die Erdatmosphäre ein und verglühte größtenteils, der Rest stürzte ins Meer.

Der Nachfolger Tiangong 2 war zwischen September 2016 und Juli 2019 im All. Er besaß gegenüber Tiangong 1 stark überarbeitete Lebenserhaltungssysteme und ermöglichte dadurch einen längeren Aufenthalt im Raumlabor. Eine zweiköpfige Besatzung wohnte und arbeitete dort 2016 für 29 Tage. 2017 wurden außerdem mehrere ferngesteuerte Koppelmanöver mit einem unbemannten Raumfrachter geübt, der das Raumlabor auch betankte.

Die aus einem Kernmodul sowie zwei Wissenschaftsmodulen bestehende chinesische Raumstation wurde zwischen April 2021 und November 2022 aufgebaut und hat eine Nettomasse von etwa 68,5 Tonnen. Sind noch ein unbemannter Raumtransporter und beim Schichtwechsel zwei bemannte Shenzhou-Raumschiffe angedockt, erhöht sich diese Masse auf 90 Tonnen. Dazu kommen schließlich noch rund 10 Tonnen auswechselbare Nutzlasten. Seit dem 5. Juni 2022 ist die Raumstation dauerhaft besetzt.

Aus technischer Sicht besitzt China damit heute alle notwendigen Voraussetzungen, um im Konzert der raumfahrenden Nationen auf Augenhöhe mitspielen zu können. Problematisch ist die Art, wie die bemannte Raumfahrt im chinesischen Staat verankert ist.

Die China Manned Space Agency (CMSA)

Die Zuständigkeit für das bemannte Raumfahrtprogramm der Volksrepublik China liegt beim Büro für bemannte Raumfahrt, englisch **China Manned Space Agency**. Es ist in der Abteilung für Waffenentwicklung der Zentralen Militärkommission angesiedelt. Im Gegensatz zur US-amerikanischen **National Aeronautics and Space Administration (NASA)** und der europäischen

European Space Agency (ESA) ist das chinesische Pendant also keine zivile, sondern eine militärische Einrichtung. Und als Teil des Militärs hat das chinesische Büro für bemannte Raumfahrt keine primär zivile Ausrichtung.

Ausrichtung der Raumfahrtagenturen

Die NASA nennt als das übergreifende Ziel all ihrer Aktivitäten, die Geheimnisse des Universums zum Wohle aller zu erforschen. Sie versteht sich als eine Institution, die primär der Wissenschaft, Forschung und Bildung dient. So sind beispielsweise Bild-, Audio- und Videomaterial sowie computergenerierte Grafiken und Publikationen für jedermann frei zugänglich.

Auch für die ESA stellt die Erforschung des Universums eines ihrer Kernanliegen dar. Daneben versteht sie sich als Wegbereiterin für die kommerzielle Nutzung des Alls durch europäische Unternehmen. Und sie versucht, beispielsweise durch Wetterbeobachtungs- und Navigationssatelliten, grundlegenden Schutz- und Sicherheitsbedürfnissen der Europäer gerecht zu werden.

Weder NASA noch ESA verfolgen in irgendeiner Form militärische Ziele.

Die China Manned Space Agency macht hingegen keine Aussagen dazu, welche übergeordneten Ziele sie anstrebt. Auf der englischsprachigen Seite ihrer Internetpräsenz findet sich lediglich der Verweis auf einen Beschluss Chinas aus dem Jahr 1992. Dieser sieht die Entwicklung von Technologien und Fähigkeiten vor, die für den langfristigen Aufenthalt von Menschen im All notwendig sind. Wozu diese Fähigkeiten genutzt werden sollen, bleibt allerdings offen.

Das Wolf Amendment

2007 hatte China erfolgreich einen seiner eigenen Satelliten mit einer Rakete angegriffen und zerstört. Dies schürte in den Vereinigten Staaten große Zweifel an den friedlichen Absichten der Chinesen. Auf Initiative des republikanischen Abgeordneten Frank Wolf verabschiedete der Kongress am 15. April 2011 einen Haushaltszusatz, das sogenannte Wolf Amendment, das China von einer Teilnahme an zivilen US-amerikanischen Raumfahrtaktivitäten wie der ISS ausschließt. Damit soll ein ungewollter Transfer gleichermaßen zivil wie militärisch nutzbaren Wissens in Richtung China verhindert werden.

Allerdings ist das Wolf Amendment in den Vereinigten Staaten nicht unumstritten. Die Gegner führen unter anderem ins Feld, dass Chinas Ausschluss von Kooperationen, an denen die USA beteiligt sind, die Entwicklung konkurrierender chinesischer Systeme regelrecht befeuern würde. Zudem erschwere der so getriebene chinesische Alleingang eine Einschätzung von außen, welche Aktivitäten zivilen und welche militärischen Zielen dienen. Das Ergebnis wäre ein Wettrüsten im Bereich der Weltraumtechnologien, in dem sich zwei Großmächte misstrauisch und potentiell feindlich gegenüberstünden. Eine solche Situation berge immer auch ein Risiko zu ungewollter Eskalation. Insofern sehen die Gegner im Wolf Amendment einen strategischen Fehler.

Fazit

Tatsächlich kann man den Eindruck gewinnen, dass sich das neu erwachte Interesse Amerikas an bemannten Missionen zum Mond vor allem aus der Angst speist, gegenüber China an Boden zu verlieren. Umso wichtiger wäre es, im Gespräch zu bleiben und kooperative Umgangsformen zu pflegen. Zusammenarbeit in zivilen Projekten generiert Erfolge für alle Beteiligten, betont Gemeinsamkeiten und vermeidet das Entstehen unnötiger Interessenskonflikte.

Natürlich kann nicht außer Acht gelassen werden, dass China in der Vergangenheit immer wieder durch repressives Verhalten und aggressive Rhetorik auf sich aufmerksam gemacht hat. Der Tibet-Konflikt, der Umgang mit den Uiguren, die territorialen Ansprüche im Chinesischen Meer sind hier nur einige Beispiele. Die Entwicklung technologischer Potentiale in China wachsam zu begleiten und verantwortungsvoll darauf zu reagieren, ist daher fraglos ebenso geboten.

So mag die physische Anwesenheit von Menschen auf dem Mond, dem Mars oder anderswo technisch überflüssig und wirtschaftlich unsinnig sein. Die Bedenken Amerikas jedoch, China könnte sich im Bereich der bemannten Raumfahrt einen technologischen Vorsprung verschaffen, die werden sich nicht so ohne weiteres ausräumen lassen. Und wie China mit einer Monopolstellung umgehe, das ist in der Tat schwer vorherzusagen. Man muss die Sorgen der Vereinigten Staaten nicht zwingend teilen, kann ihnen aber durchaus mit Verständnis und einer gewissen Sympathie begegnen.

Und man darf sich auch einfach faszinieren und begeistern lassen von der bemannten Raumfahrt als einer großartigen, technischen Leistung, zu der Menschen durch kooperatives Verhalten befähigt werden.

Schlussformel

In diesem Sinne: Bleibt neugierig!

Euclid. Fragen an die Geometrie des Raumes.

Das Weltraumteleskop Euclid hat Großes vor. Es soll die bislang umfangreichste und detaillierteste 3-dimensionale Karte des Universums erstellen. Und so dabei helfen, den Schleier zu lüften, der Dunkle Materie und Dunkle Energie umgibt.

O-Ton 1

[Audiomitschnitt, Raketenstart am 1. Juli 2023 von Cape Canaveral in Florida]

Zusammenfassende Einleitung

Am 1. Juli hat sich Euclid, das jüngste Weltraumteleskop der ESA, auf seinen Weg ins All gemacht. An Bord einer SpaceX Falcon 9 hob es vom Weltraumbahnhof in Cape Canaveral ab. Euclid soll im Laufe seiner Mission die bislang umfangreichste und detaillierteste 3-dimensionale Karte des Universums erstellen, auf die Wissenschaftler zurückgreifen können. Mit diesen Daten hoffen sie, den Geheimnissen um die Dunkle Materie und die Dunkle Energie auf die Spur zu kommen.

Jingle

[Schluss leiser und mischen mit]

Ihr hört Bento. Naturwissenschaft, Technik, Gesellschaft. Ich bin Jörg-Martin Batke.

Dunkle Materie

Mit dem Weltraumteleskop Euclid hat sich die ESA wahrhaft Großes vorgenommen. Innerhalb von 6 Jahren, so lange soll die Mission dauern, will sie gut ein Drittel der Himmelssphäre bis in eine Entfernung von rund 10 Milliarden Lichtjahren kartieren. Euclid wird dabei nach oben und unten aus der Scheibenebene unserer Heimatgalaxie ins All blicken und nicht nur Lage, Größe und Form von Milliarden von Galaxien erfassen, sondern auch, wie sich deren Licht auf seinem Weg zu uns ausbreitet. Tut es das geradlinig, so wie man das in einem ebenen Raum erwarten würde? Oder wird es womöglich unterwegs abgelenkt, z.B. weil unsichtbare Massen den Raum krümmen?

Euclid soll also helfen, dem Rätsel um die Dunkle Materie auf die Spur zu kommen.

Dunkle Energie

Daneben ist der Blick in die Tiefen des Kosmos aber nicht nur ein Blick in die Ferne, sondern auch einer in die Vergangenheit. Je weiter ein Objekt von uns weg ist, desto weiter blicken wir in der Zeit zurück. Denn das Licht von dort hat entsprechend länger gebraucht, um uns zu erreichen. Und das bedeutet, dass wir uns in Abhängigkeit von der Entfernung direkt anschauen können, wie sich die Strukturen im All im Laufe der Zeit entwickelt haben. Wir sehen dem Universum also sozusagen beim Wachsen zu.

Mit diesen Informationen wollen die Wissenschaftler Antworten auf die zweite, brennende Frage der modernen Astrophysik bekommen: Warum beschleunigt sich die Expansion des Universums? Welche geheimnisvolle Eigenschaft ist dafür verantwortlich, was ist die Dunkle Energie?

Euclids Arbeitsplatz: Der Lagrange-Punkt L_2 des Systems Sonne-Erde

Je weiter Euclid ins All hinausblickt, desto lichtschwächer werden die Objekte, die dort draußen noch zu sehen sind. Und umso wichtiger wird es, störende Einflüsse auf die Aufnahmen und Messungen zu reduzieren. Deshalb bekommt das Weltraumteleskop einen ganz besonderen Arbeitsplatz: Den sogenannten Lagrange-Punkt L_2 des Systems Sonne-Erde. Das ist ein virtueller Punkt im Raum, der auf der Verlängerung der Verbindungslinie Sonne-Erde liegt. Und zwar rund 1,5 Millionen Kilometer weiter von der Sonne entfernt als die Erde.

Halo-Orbit

Normalerweise benötigt ein Körper für einen Umlauf um die Sonne umso länger, je weiter er von ihr entfernt ist. Das Besondere am Lagrange-Punkt L_2 ist nun, dass sich hier die Gravitationskräfte von Sonne und Erde gerade so überlagern, dass ein Körper, der sich dort befindet, genauso viel Zeit für eine Umrundung der Sonne braucht wie die Erde. Die Orientierung von Sonne, Erde und einem solchen Körper in L_2 ist zueinander also stabil. Dabei wird Euclid nicht genau im Lagrange-Punkt L_2 geparkt, sondern beschreibt einen sogenannten Halo-Orbit um diesen. Das Teleskop umkreist L_2 langsam auf elliptischen Bahnen, etwa einmal in 6 Monaten, wobei der Abstand zum Lagrange-Punkt zwischen 400.000 und 800.000 Kilometern variiert. Euclid holt damit weiter aus als der Mond um die Erde, und die Bahnen liegen außerhalb der Schatten, die Erde und Mond werfen.

Vorteile des Arbeitsortes

Das bietet den Vorteil, dass sich Euclid so orientieren lässt, dass es der Sonne stets den Rücken, also sein mit Solarzellen versehenes Hitzeschild zuwendet, ohne bei seiner Arbeit durch Erde oder Mond behindert zu werden. Die kühle Seite mit der Teleskopöffnung zeigt in die Tiefen des Weltraums. Durch die konstante, einseitige Bestrahlung ist die Gesamtkonstruktion thermisch stabil, und die ebenfalls auf der Rückseite angebrachte Richtantenne steht dauerhaft für die Kommunikation mit der Erde zur Verfügung.

Das Teleskop

Euclid hat zwei Instrumente an Bord, die beide durch dasselbe Spiegelteleskop blicken und den gleichen Himmelsausschnitt beobachten. Dieses 3-Spiegel-Korsch-Teleskop verfügt über einen Hauptspiegel mit einem Durchmesser von 1,20 Meter. Ein Spektralfilter hinter dem Teleskop teilt das Licht in einen sichtbaren und einen infraroten Anteil auf und führt diese getrennt zwei CCD-Kameras zu.

Das VISIBLE Instrument (VIS)

Die erste Kamera, das sogenannte VISIBLE Instrument (VIS), nimmt hochauflösende Bilder im sichtbaren Bereich auf und ist für Wellenlängen zwischen 550 und 900 Nanometern empfindlich. (Zur Einordnung: Das menschliche Auge nimmt Strahlung etwa zwischen 400 und 700 Nanometern wahr.) Die Kamera nutzt ein Mosaik aus 36 CCD-Sensoren mit jeweils 16 Megapixeln und verfügt damit über mehr als 575 Megapixel. Das entspricht in etwa der Auflösung von 70 4k-Fernsehern. Diese extrem scharfen Bilder erlauben es, die Form auch sehr weit entfernter (und damit sehr klein erscheinender) Galaxien noch präzise zu bestimmen. Deren Abbilder werden auf ihrem Weg zu uns durch Gravitationsfelder bzw. Bereiche gekrümmten Raumes, die sie durchlaufen, verzerrt. Der Effekt wird als Gravitationslinseneffekt bezeichnet. Aus diesen Verzerrungen lassen sich dann Rückschlüsse auf die Verteilung der Gravitationsfelder bzw. das Krümmungsverhalten des Raumes ziehen.

Das Near-Infrared Spectrometer and Photometer (NISP)

Das zweite Instrument, eine Kamera für nahes Infrarot, ist dazu gedacht, das Licht dieser Galaxien auf seine spektrale Zusammensetzung hin zu untersuchen. Dieses Near-Infrared Spectrometer and Photometer (kurz: NISP) gibt also Auskunft darüber, wieviel Licht ein Objekt bei welcher Wellenlänge emittiert. Damit lässt sich die sogenannte kosmologische Rotverschiebung bestimmen, die ein Maß dafür ist, wie weit ein Objekt von uns entfernt ist.

Expandiert der Raum, dehnen sich elektromagnetische Wellen, die sich in ihm ausbreiten, in gleicher Weise mit. Ihre Wellenlänge wird größer. Und im sichtbaren Spektrum besitzt die Farbe Rot die größte Wellenlänge, daher die Bezeichnung Rotverschiebung. Je länger ein Photon durch den Raum reist, desto größer wird seine Wellenlänge, und man kann an der Zunahme ablesen, in welcher Entfernung es gestartet ist.

Das Instrument stützt sich dabei auf eine Anordnung aus 16 CCD-Chips mit insgesamt 64 Megapixeln und ist empfindlich für Licht zwischen 900 und 2000 Nanometern Wellenlänge.

Die 3-D-Karte

Kombiniert man die Informationen beider Instrumente, ergibt sich daraus eine 3-dimensionale Karte des Universums. In dieser ist einmal die Verteilung der leuchtenden Materie verzeichnet, also all der Galaxien und Gas- und Staubwolken, die wir sehen können. Daneben gibt sie über den Gravitationslinseneffekt aber auch Aufschluss über die Verteilung von Krümmungen des Raumes, die augenscheinlich nicht durch leuchtende Materie hervorgerufen werden. So hoffen die Wissenschaftler, der Ursache für diese Anomalien im Raum auf die Spur zu kommen. Gibt es die vermutete Dunkle Materie? Und wenn ja, welche Eigenschaften hat sie und woraus besteht sie?

Warum nach Dunkler Materie gesucht wird

Was hat diese Suche nach Dunkler Materie überhaupt ausgelöst?

Nun, Masse krümmt den Raum, das wissen wir. Und befindet sich eine weitere Masse in einem solchermaßen gekrümmten Raum, erfahren beide Massen eine anziehende Kraft. Wir können ausrechnen, wie groß diese Kraft ist, und vorhersagen, wie sich die Massen bewegen werden. Beim Blick ins Universum haben Astronomen aber festgestellt, dass sich große Massen dort anders bewegen, als dies zu erwarten wäre, wenn man nur die Masse der sichtbaren Materie zugrunde legt. Der Raum scheint dort stärker gekrümmt zu sein, als er es sein dürfte, wenn er nur durch die leuchtende Materie gekrümmt würde. Die Außenbereiche von Galaxien beispielsweise rotieren derart schnell, dass die Sterne eigentlich in hohem Bogen hinaus ins Universum geschleudert werden müssten. Was ganz offensichtlich nicht passiert. Also, so die Schlussfolgerung der Astrophysiker, müsse da noch weitere, wenn auch unsichtbare Masse sein, die für die notwendige Anziehungskraft sorgt.

Nur eine Hypothese

Es ist aber wichtig, zu verstehen, dass es sich hierbei um eine Hypothese handelt. Sie geht von einem Zusammenhang zwischen Masse und Raumkrümmung aus, den man in der Mathematik eine **eindeutige Zuordnung** nennt. Also eindeutig in beiden Richtungen. Soll heißen: Masse verursacht immer eine Krümmung des Raumes, und umgekehrt werden Raumkrümmungen immer durch Masse verursacht. Letzteres, also dass Raumkrümmungen immer durch Masse verursacht werden, setzt voraus, dass der Raum selbst euklidisch ist. Das bedeutet, er ist in **Abwesenheit** von Massen, die ihn krümmen würden, eben. Der reine Raum selbst darf also nicht verformt sein.

Einwand

Ja Moment, werden jetzt einige von Euch sagen. Wenn zutrifft, dass das Universum erstens endlich und zweitens geschlossen ist, dann kann der globale Raum des Universums doch gar nicht eben sein. Und da habt Ihr recht. Man kann sich das sehr leicht klar machen, indem man das Problem um eine Dimension reduziert, also vom 3-dimensionalen Raum auf eine 2-dimensionale Fläche überträgt.

Wenn Ihr ein Blatt Papier auf eine ebene Unterlage legt, dann ist die Fläche dieses Blattes endlich, und sie besitzt Ränder, d.h. sie ist offen. Betrachtet Ihr hingegen die Oberfläche einer Kugel, dann ist zwar auch diese Fläche endlich, besitzt jedoch keine Ränder. Sie ist geschlossen. Und das geht nur, weil die 2-dimensionale Fläche in der dritten Dimension gekrümmt ist. Die gedachten Ränder berühren sich.

Mit einem als geschlossen angenommenen Raum des Universums verhält es sich ganz analog. Er muss ebenfalls gekrümmt sein, und dies sogar in zwei zusätzlichen Dimensionen, damit sich seine gedachten Ränder berühren können.

Allerdings sind weder die Endlichkeit noch die Geschlossenheit des Universums gesichert; beides sind lediglich Annahmen.

Euclids Strukturanalyse

Materie und Masse sind nicht gleichförmig im All verteilt, das wissen wir bereits. Vielmehr formen sie gewaltige, filamentartige Strukturen, die das Universum wie ein kosmisches Netz durchziehen. Was den Astronomen bisher aber fehlt, ist ein „Big Picture“, eine großräumige und flächendeckende Durchmusterung des Kosmos mit ausreichend hoher Detailtiefe. Sie brauchen sehr viel exaktere Daten über die Struktur dieses kosmischen Netzes einerseits und die Eigenschaften des Raumes andererseits, um ihre Theorien zur Dunklen Materie überprüfen zu können. Euclid wird ihnen diese Daten liefern.

Die Annahme einer euklidischen Geometrie ist zwar plausibel, aber keine bewiesene Tatsache. Ebenso wie die damit verknüpfte Hypothese, der Raum sei isotrop, verhalte sich also in allen Richtungen gleich. Auch diese Fragen nach den geometrischen Eigenschaften des Universums soll das Weltraumteleskop daher mit seiner detaillierten Strukturanalyse beleuchten.

Und, indem wir unseren Blick auf unterschiedliche Entfernungen fokussieren (und wir damit unterschiedlich weit in die Vergangenheit blicken), erfahren wir etwas darüber, wie sich das kosmische Netz im Laufe der Zeit entwickelt und verändert hat. Warum beschleunigt sich die Expansion des Universums, obwohl die Gravitationskraft dieser Ausdehnung eigentlich entgegenwirken sollte? Lässt sich aus der Evolution der kosmischen Strukturen etwas über diesen Mechanismus lernen? Worum handelt es sich bei dem, was die Wissenschaftler Dunkle Energie getauft haben?

Vielleicht gelingt es Euclid, den Schleier um Dunkle Materie und Dunkle Energie zu lüften. Möglich ist aber auch, dass wir stattdessen erkennen müssen, dass unser Bild vom Raum selbst eines neuen Fundaments bedarf.

Ihr wisst ja: Dogmen sind wie Laternen, sie leuchten den Weg. Aber nur Betrunkene halten sich daran fest.

Schlussformel

In diesem Sinne, bleibt neugierig!

Welt der Quanten. An die Grenzen unserer Vorstellungskraft.

Quanten sind die Basiseinheiten des Universums. Alles scheint aus ihnen aufgebaut: Materie, Felder, sogar Raum und Zeit. Doch obwohl wir alles auf sie zurückführen, scheitern wir an einer geschlossenen Beschreibung dessen, was sie sind.

O-Ton 1

[Audiomitschnitt, Max Planck am 15. Dezember 1942]

„Theoretische Physik, das ist ja ein ganz schönes Fach, obwohl es gegenwärtig keine Lehrstühle dafür gibt. Aber grundsätzlich Neues werden Sie darin kaum mehr leisten können. Denn mit der Entdeckung des Prinzips der Erhaltung der Energie ist wohl das Gebäude der theoretischen Physik ziemlich vollendet. Man kann wohl hier und da in dem einen oder anderen Winkel ein Stäubchen noch rauskehren, aber was prinzipiell Neues, das werden Sie nicht finden.“

Zusammenfassende Einleitung

Der 84-jährige Max Planck erzählt in dieser Aufnahme vom 15. Dezember 1942, wie er von seinem Münchner Mentor Philipp von Jolly nach Berlin verabschiedet wurde. Er wollte sich in seinem letzten Studienjahr an der dortigen Friedrich-Wilhelms-Universität mit theoretischer Physik beschäftigen. Das Gebäude der theoretischen Physik, so von Jollys Meinung, sei im Wesentlichen fertig gestellt. Großartige neue Erkenntnisse wären dort nicht mehr zu erwarten. Eine damals durchaus verbreitete Ansicht.

Was für ein Irrtum. Planck war fasziniert von dem durch Rudolf Clausius eingeführten Begriff der Entropie, einem Maß für den Ordnungsgrad eines Systems, und dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Er versuchte, die Konzepte der Thermodynamik auf ein Problem zu übertragen, um dessen Lösung sich im ausgehenden 19. Jahrhundert eine ganze Reihe von Wissenschaftlern bemühte: Die mathematische Beschreibung der sogenannten Hohlraum- oder Schwarzkörperstrahlung. Der Durchbruch gelang Planck mit dem Postulat, dass Energie zwischen Materie und Strahlungsfeld nur in wohldefinierten Portionen, den sogenannten Quanten, ausgetauscht werden könne. Diese Quantenhypothese legte im Jahr 1900 den Grundstein zur modernen Quantentheorie.

Jingle

[Schluss leiser und mischen mit]

Ihr hört Bento. Naturwissenschaft, Technik, Gesellschaft. Ich bin Jörg-Martin Batke.

Max Planck, ein „klassischer“ Physiker

Obwohl Max Planck also einen ersten Anstoß zur Begründung der Quantentheorie gab, war er im Grunde seines Herzens doch tief in der klassischen Physik verwurzelt. Das Postulat, Energie werde zwischen Materie und Strahlungsfeld nur portionsweise ausgetauscht, verstand er als einen notwendigen mathematischen Kunstgriff, um die statistischen Methoden der Thermodynamik auf das Problem der Schwarzkörperstrahlung anwenden zu können. Das Strahlungsfeld selbst setzte Planck aber als eine kontinuierliche Erscheinung voraus. Schließlich hatte Thomas Young mit seinem

Doppelspaltexperiment bereits 1802 zweifelsfrei bewiesen, dass Licht eine Welle ist. Das schloss für Planck eine Quantennatur des Lichts aus. Daher bemühte er sich in den Folgejahren auch intensiv wenngleich vergeblich, seiner Quantenhypothese eine real-physikalische Entsprechung zuzuordnen, die sich mit den Vorstellungen der klassischen Physik vereinbaren ließe.

Zur Erklärung: Ein Postulat ist in der Physik ein unbewiesener Sachverhalt, der dennoch als wahr vorausgesetzt wird, um aus ihm dann weitere Aussagen abzuleiten. Gelangt man so zu einer Beschreibung, die sich mit der beobachteten Wirklichkeit deckt, also nachprüfbar wahr ist, kann man zurückschließen, dass auch das Postulat eine physikalisch relevante Aussage enthalten haben muss, die es dann im Hinblick auf die Natur zu interpretieren gilt.

Albert Einstein und der äußere photoelektrische Effekt

Den Schritt, Plancks Quanten (wir nennen sie heute Photonen) nicht als bloße Rechengröße zu betrachten, sondern sich das Strahlungsfeld als real aus ihnen zusammengesetzt vorzustellen, wagte erst Albert Einstein. Diese Annahme ermöglichte es ihm 1905, die experimentellen Befunde des äußeren photoelektrischen Effekts zutreffend zu erklären.

Trotz dieses Erfolges seiner Hypothese vermochte Einstein Planck damit nicht zu überzeugen. Bezeichnenderweise schrieb Planck noch 1913, als er für Einsteins Aufnahme als ordentliches Mitglied in die Preußische Akademie der Wissenschaften warb:

„Zusammenfassend kann man sagen, dass es unter den großen Problemen, an denen die moderne Physik so reich ist, kaum eines gibt, zu dem nicht Einstein in bemerkenswerter Weise Stellung genommen hätte. Dass er in seinen Spekulationen gelegentlich auch einmal über das Ziel hinausgeschossen haben mag, wie z. B. in seiner Hypothese der Lichtquanten, wird man ihm nicht allzu schwer anrechnen dürfen; denn ohne einmal ein Risiko zu wagen, lässt sich auch in der exaktesten Naturwissenschaft keine wirkliche Neuerung einführen.“

Für die Erklärung des äußeren photoelektrischen Effekts erhielt Einstein 1922, rückwirkend für das Jahr 1921, den Nobelpreis für Physik. Er nahm seine Auszeichnung damit zeitgleich mit einem anderen Wissenschaftler entgegen, der für die Entwicklung der Quantentheorie eine zentrale Rolle spielte: Niels Bohr.

Das Bohrsche Atommodell

Bohr hatte sich mit dem Phänomen beschäftigt, dass Atome, wenn man sie energetisch anregt, anders als thermische Strahler kein kontinuierliches Spektrum emittieren. Stattdessen zeigen sie scharfe Emissionslinien, deren Energien für das jeweilige Element charakteristisch sind.

Ähnlich wie Planck griff Bohr auf das Instrument des Postulats zurück, um für seine Erklärung das notwendige Fundament zu schaffen. Er nahm an, dass die Elektronen im Atom nicht beliebige Energien annehmen können. Vielmehr müsse es diskrete, energetisch stabile Zustände geben, in denen die Elektronen gebunden seien. Ein Wechsel zwischen zwei stabilen Zuständen erfolge sprunghaft und sei mit der Abgabe oder Aufnahme der Energiedifferenz in Form eines Photons verbunden. Mit dieser These quantisierter Elektronenzustände im Atom gelang es Bohr 1913, das Linienspektrum des Wasserstoffs erfolgreich zu erklären. Und damit hatte die Quantenhypothese in einen weiteren fundamentalen Bereich der Physik Einzug gehalten: Die Atomtheorie.

Für diese Verdienste um die Erforschung der Struktur der Atome und der von ihnen ausgehenden Strahlung erhielt Niels Bohr den Nobelpreis für Physik des Jahres 1922.

Louis de Broglie und die Wellennatur der Materie

Schon die Arbeiten von Planck, Einstein und Bohr waren bahnbrechend. Doch sie öffneten Türen in Bereiche der theoretischen Physik, deren Existenz niemand zuvor auch nur geahnt hatte. So erging es der Fachwelt 1924, als ein damals unbekannter Franzose seine Doktorarbeit einreichte: Louis de Broglie. In seiner Schrift verknüpfte er die Planck-Einstein-Relation $E = h \cdot f$, die Strahlungsfrequenz und Photonenenergie in Beziehung setzt, mit der von Einstein gefundenen Äquivalenz von Masse und Energie $E = m \cdot c^2$, die jedem massebehafteten Teilchen eine Ruheenergie zuweist.

Louis de Broglie folgerte, dass der für Photonen bereits bekannte Welle-Teilchen-Dualismus ein Wesensmerkmal der Materie allgemein sein müsse. Der Quantencharakter der Materie, wie er sich beispielsweise in den Linienspektren der Atome zeigt, lasse sich nur erklären, wenn auch klassischen Teilchen wie Elektronen Wellenaspekte zugesprochen werden. Ein bewegtes Teilchen besitzt dann eine impulsabhängige Wellenlänge. Und tatsächlich gelang es 1927, Materiewellen an Elektronen erstmals experimentell nachzuweisen. Inzwischen ist dieser Nachweis nicht nur für ganze Atome, sondern sogar für größere Moleküle gelungen.

Für diese weitsichtige, theoretische Vorhersage der Materiewellen, deren Bedeutung kaum hoch genug eingeschätzt werden kann, wurde Louis de Broglie 1929 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.

Das Doppelspaltexperiment

In unserem makroskopischen Anschauungsraum sind Welle und Teilchen zwei Phänomene, die ihrer Natur nach unvereinbar sind. Hier das Teilchen, räumlich scharf abgegrenzt und in allen seinen physikalischen Eigenschaften eindeutig lokalisiert. Und dort die Welle, eine sich räumlich ausbreitende, periodische oder einmalige Auslenkung eines Systems aus seinem Gleichgewichtszustand, die an vielen Orten gleichzeitig und in unterschiedlicher Stärke präsent sein und wechselwirken kann.

Trotz dieser Widersprüchlichkeit vereinen Quanten in ihren Eigenschaften Teilchen- und Wellenaspekte. Besonders plastisch lässt sich dies am Beispiel des Doppelspaltexperiments veranschaulichen. Das Doppelspaltexperiment wurde ursprünglich erdacht, um zu zeigen, dass Licht sich wie eine Welle verhält. Erst viel später wurde erkannt, dass es auch zur Charakterisierung von Materiewellen benutzt werden kann.

Leuchtet man mit einer einfarbigen Lichtquelle durch eine Blende mit zwei schmalen, parallelen und eng benachbarten Spalten, dann zeigt sich auf einem entfernten Beobachtungsschirm dahinter ein periodisches Muster aus hellen und dunklen Streifen, die fließend ineinander übergehen. Dieses sogenannte Interferenzmuster entsteht, weil sich die von den beiden Spalten ausgehenden Lichtwellen überlagern. Treffen dabei Wellenberge auf Wellenberge, verstärken sich die Wellen gegenseitig, und der entsprechende Bereich auf dem Schirm ist besonders hell. Treffen hingegen Wellenberge auf Wellentäler, löschen sich die Wellen aus, und der Schirm bleibt an dieser Stelle dunkel. Und weil auch sämtliche Zwischenwerte möglich sind, sind die Übergänge zwischen hell und dunkel fließend. Ob es zu Verstärkung, Abschwächung oder Auslöschung des Lichts kommt, hängt davon ab, wie groß der Wegunterschied von den beiden Spalten zum betrachteten Punkt auf dem Beobachtungsschirm ist.

Verwendet man nun anstelle von Licht klassische Teilchen, also beispielsweise Elektronen, dann wird auf dem Beobachtungsschirm jedes Elektron auch als einzelnes Teilchen registriert. Aber in der Dichteverteilung vieler Elektronen findet man das vom Licht bekannte Interferenzmuster. Und zwar erstaunlicherweise selbst dann, wenn sich immer nur ein einzelnes Elektron in der

Versuchsanordnung befindet und man die Ergebnisse vieler Einzelversuche anschließend überlagert. Es ist, als würde jedes einzelne Elektron als Welle durch beide Spalte gehen und mit sich selbst interferieren. Um am Ende doch wieder als Teilchen detektiert zu werden.

Bilder aus der makroskopischen Welt

Unsere Schwierigkeiten, dieses Ergebnis zu interpretieren und zu verstehen, rühren vor allem daher, dass wir Bilder der makroskopischen Welt, die wir mit unseren Sinnen unmittelbar erleben und erfahren können, auf die Welt der Quanten zu übertragen versuchen. Wenn es ein Fußball, den wir auf eine Torwand schießen, auf die andere Seite der Wand schafft, dann muss er zwangsläufig durch eine der beiden Öffnungen geflogen sein. Und der Ort, an dem er auf der anderen Seite auftritt, wird immer auf der Verlängerung der Geraden zwischen Abschussort und Öffnung liegen. Weder geht der Ball durch beide Öffnungen gleichzeitig, noch bilden die Zielorte jenseits der Wand eine breite, musterartige Verteilung.

Eigentlich ist es eine gute Sache, dass wir Neues vor dem Hintergrund unserer Erfahrungen zu verstehen versuchen. Aber manchmal ist dieses Neue so unerwartet anders, dass wir die Bilder, die sich uns aufdrängen, selbst dann noch zu retten versuchen, wenn sie ganz offensichtlich versagen. Schießen wir unseren Fußball gegen eine fensterlose Hauswand, prallt er von dieser ab. Es wird nicht vorkommen, dass der Ball bei Berührung mit der Außenseite der Mauer verschwindet und im Inneren des Hauses wieder auftaucht. Genau das kann in der Welt der Quanten aber passieren. Und schon die Namensgebung dieses Phänomens, Tunneleffekt, illustriert unsere Ratlosigkeit. Ein Teilchen, das auf eine Barriere trifft, davor verschwindet und dahinter wieder auftaucht, das muss doch auch irgendwie hindurch gegangen sein. Und sei es, wie ein Geist, der durch Wände geht. Wir halten an diesem Bild fest, gleichwohl es dem physikalischen Vorgang nicht gerecht werden kann.

Und schließlich gibt es in der Welt der Quanten noch ein Phänomen, da versagen unsere Bilder nicht nur, wir haben schlicht keines: Die sogenannte Paarerzeugung. Führt man dem leeren Raum in geeigneter Weise Energie zu, tauchen, quasi aus dem Nichts, Teilchen auf. Genau genommen sind es, aus Symmetriegründen, Teilchenpaare, wie zum Beispiel ein Elektron-Positron-Paar. Und wie ihr am Beispiel des Elektron-Positron-Paares bereits sehen könnt, sind das nicht etwa Teilchen mit beliebigen Eigenschaften. Vielmehr reihen sich diese in das Portfolio bekannter Teilchen und Eigenschaften ein. Woher aber weiß der leere Raum, wie ein Elektron auszusehen hat, also welche Masse es besitzt, welche Ladung es trägt usw.? Diese Information muss ja irgendwo hinterlegt sein. Man kann aus diesem Mechanismus der Paarerzeugung daher einen interessanten Schluss ziehen. Leerer Raum ist auf Ebene der Quanten, anders als in der makroskopischen Welt, nicht eigenschaftslos. Der Raum besitzt eine innere Struktur.

Das Gittermodell

Um einen Zugang zur Welt der Quantenphänomene zu finden, müssen wir uns von den Bildern lösen, die wir ganz unwillkürlich vor Augen haben, wenn wir an Wellen und Teilchen denken. Das folgende Modell hat, wie alle anderen vom Makroskopischen abgeleiteten Modelle auch, Schwächen und Beschränkungen. Dennoch lassen sich mit seiner Hilfe einige sehr wichtige Aspekte begreiflich machen.

Stellt Euch den Raum als ein filigranes Gitter vor. Also kein Gitter im Raum, sondern das Gitter selbst soll der Raum sein. Die Gitterpunkte nehmen wir dabei als so nah beisammen liegend an, dass selbst das Innere eines Atoms noch von einem dichten Geflecht durchzogen wäre. Jeder Gitterpunkt kann in allen Raumrichtungen frei um seine Ruhelage schwingen; in der Physik nennt man so ein System einen Oszillator. Und benachbarte Oszillatoren sollen elastisch miteinander verbunden sein. Wird also ein Oszillator in Schwingungen versetzt, gibt er davon etwas auch an seine Nachbarn weiter.

In einem so konstruierten Raumgitter lassen sich nun unterschiedlichste Schwingungen und Wellen anregen. Benachbarte Gitterpunkte können dabei in verschiedenen Raumrichtungen sowie in Phase, phasenverschoben oder auch gegenphasig schwingen. Wir erhalten so eine bunte Vielfalt an möglichen Anregungsmodi. Und nun nehmen wir an, dass jedem dieser Anregungsmodi eine Teilcheneigenschaft entspricht. Das kann z.B. die Ladung sein oder die Masse. Ein Teilchen würde in diesem Modell demnach durch einen Satz aus Anregungsmodi repräsentiert, und zwar genau der Anregungsmodi, die den spezifischen Teilcheneigenschaften entsprechen. Und wir sehen auch, dass die so konstruierten Teilchen sich über ein gewisses Gittervolumen erstrecken, dafür sorgt die elastische Kopplung benachbarter Oszillatoren.

Grenzen des makroskopischen Modells

In einem realen, makroskopischen Gitter würden sich Schwingungen, ausgehend vom Ort der Anregung, natürlich immer weiter im Gittervolumen ausbreiten. Dadurch repräsentierte Teilchen würden also zerfließen und sich schließlich auflösen. Das tun Quanten aber ganz offensichtlich nicht. Wir haben damit ein ähnliches Problem wie Niels Bohr, der energetisch stabile Elektronenzustände im Atom annehmen musste, obwohl dies im Widerspruch zu den Gesetzen der klassischen Elektrodynamik steht. Nach denen würden Elektronen als geladene Teilchen, die um einen Atomkern kreisen, nämlich strahlen, dabei Energie verlieren und müssten binnen kürzester Zeit in den Kern stürzen. Genau wie Bohr deshalb energetisch stabile Elektronenzustände einfach postuliert hat, nehmen wir an, dass auch unsere Anregungsmodi und die durch sie repräsentierten Teilchen stabile Zustände darstellen.

Teilchen als Manifestation der Eigenschaften des Raumes

In diesem Modell lässt sich nun die vorhin gestellte Frage, woher der leere Raum bei der Paarerzeugung eigentlich weiß, welche Eigenschaften ein Elektron besitzt, sofort beantworten: Es handelt sich um Anregungsmodi, um Eigenfrequenzen des Raumgitters. Es sind also die Eigenschaften des Raumgitters, die sich bei Anregung in Form von Teilchen manifestieren. Wir gewinnen damit eine ganz fundamentale Erkenntnis: Quanten sind keine Erscheinungen **im** Raum. Vielmehr sind Quanten Erscheinungen **des** Raumes, und Quanten und Raum lassen sich deshalb auch nur gemeinsam betrachten und verstehen.

Doppelspaltexperiment und Tunneleffekt im Gittermodell

Werfen wir abschließend vor dem Hintergrund dieses Modells noch einmal einen Blick auf den Tunneleffekt und das Doppelspaltexperiment. Teilchen, die sich durch den Raum bewegen, entsprechen in unserem Modell einer Verlagerung kleiner, angeregter Volumina innerhalb des Raumgitters. Dies setzt voraus, dass die beteiligten Oszillatoren dieser Raumgitterbereiche frei schwingen können. Eine Barriere im Raum ist dadurch gekennzeichnet, dass diese Schwingungen dort gedämpft werden.

Beim Tunneleffekt treffen Teilchen auf eine sehr dünne Barriere. In der Barriere werden die mit ihnen korrelierten Gitterschwingungen zwar gedämpft, aber weil die Barriere so dünn ist, erreicht ein Teil der Schwingungen trotz Dämpfung die andere Seite. Ohne dass die Barriere dabei also etwas körperlich durchquert, wird die Anwesenheit unserer Teilchen auch jenseits der Barriere im Raumgitter spürbar.

Passieren Teilchen einen Doppelspalt, so können die Oszillatoren innerhalb der Spalte dabei frei schwingen. In der Barriere dazwischen werden die Schwingungen jedoch absorbiert respektive reflektiert. Wir erinnern uns: Teilchen erstrecken sich in unserem Modell über ein gewisses Gittervolumen, können also beide Spalte erfassen. Hinter dem Doppelspalt interferieren die von den

Spalten ausgehenden Gitterschwingungen dann. Auch in diesem Fall findet, genau wie beim Tunneleffekt, keine körperliche Durchquerung des Doppelspalts statt. Vielmehr ist es eine Wirkung, die sich im Raumgitter ausbreitet.

Dem Modell liegt ein klassisches Konzept zugrunde. Es vermag Fragen nach den probabilistischen Aspekten der Quantentheorie daher auch nicht zu beantworten. Wieso werden Teilchen nur hin und wieder hinter einer Tunnelbarriere detektiert? Warum können wir den genauen Ort des Auftreffens auf den Beobachtungsschirm hinter dem Doppelspalt nicht vorhersagen? Und warum manifestieren sich die Teilchen dort, wo sie schließlich nachgewiesen werden, immer in ihrer eigenschaftlichen und energetischen Gesamtheit?

Es wird also weiterhin kluger Köpfe bedürfen, die unsere Vorstellung davon weiterentwickeln, was Quanten ihrer Natur nach tatsächlich sind.

Schlussformel

In diesem Sinne: Bleibt neugierig!

Unendliche Weiten. Die Kunst kosmischer Entfernungsmessung.

Wie weit sind beobachtete Sterne und Galaxien von uns entfernt? Wie weit blicken wir dabei in die Vergangenheit? Und wie verändern sich die kosmischen Distanzen im Laufe der Zeit? Voraussetzung dafür, dass Astronomen diese Fragen beantworten können, ist eine verlässliche Bestimmung der Entfernungen im All.

Einleitung

Es ist zur Selbstverständlichkeit geworden: Ein Blick auf das Navi im Auto oder das Smartphone in unserer Hand genügt, und wir wissen sofort, wo wir uns gerade befinden. Die Entfernung zu jedem beliebigen anderen Ort lässt sich auf den Meter genau beziffern. Kaum einer macht sich da noch Gedanken, welches Maß an naturwissenschaftlichem Verständnis und technischem Aufwand dafür notwendig ist.

Satelliten, die ins All gebracht werden müssen, ausgerüstet mit hochpräzisen Atomuhren. Das Wissen um die Gesetzmäßigkeiten der allgemeinen Relativitätstheorie, weil die Zeit an Bord der Satelliten minimal schneller vergeht als bei uns auf der Erdoberfläche. Und elektronische Schaltkreise, die, obwohl klein und stromsparend, die Laufzeiten der von den Satelliten ausgestrahlten Zeitsignale doch zuverlässig und in Echtzeit auswerten und in eine Ortsangabe umrechnen können.

Schon die Orts- und Entfernungsbestimmung auf der Erde ist also ein komplexes Unterfangen. Doch geht es um Entfernungen auf kosmischen Skalen und damit um Orte und Distanzen, die wir anders als auf der Erde physisch nicht erreichen und ausmessen können, wird es ungleich schwieriger.

Jingle

[Schluss leiser und mischen mit]

Ihr hört Bento. Naturwissenschaft, Technik, Gesellschaft. Ich bin Jörg-Martin Batke.

Die kosmische Entfernungsleiter

Tatsächlich gehört die Vermessung des Universums und die Bestimmung der Entfernungen zu den unterschiedlichen Objekten darin bis heute zu den Themen, die trotz zahlreicher Fortschritte der Astronomie nichts an Aktualität eingebüßt haben. Die Antworten auf eine ganze Reihe von astronomischen Fragestellungen hängen davon ab, wie genau wir Distanzen im Kosmos beziffern können. So ist beispielsweise der Wert der Hubble-Konstante, die die Expansion des Universums beschreibt, noch immer mit einer Unsicherheit behaftet, die zu den größten innerhalb der Physik überhaupt gehört.

Wie also gehen Astronomen vor, wenn sie das Universum vermessen? Unglücklicherweise gibt es nicht **die eine Methode**, die alle Szenarien abdeckt. Stattdessen benutzen Astronomen mehrere unterschiedliche Verfahren, die sich jeweils für einen bestimmten Entfernungsbereich eignen, und die kaskadenartig aufeinander aufbauen. Deshalb wird manchmal auch von einer kosmischen Entfernungsleiter gesprochen. Die Genauigkeit, die dabei auf einer Stufe erreicht werden kann, hängt unmittelbar von den Unsicherheiten auf den vorangehenden Stufen ab. Fehler pflanzen sich fort, und die Auswirkungen dieser Fehler werden von Stufe zu Stufe größer.

Stufe 1: Die Astronomische Einheit

Die erste Stufe dieser Entfernungsleiter ist die Bestimmung des mittleren Abstandes zwischen Erde und Sonne, der sogenannten Astronomischen Einheit. Das hört sich zunächst recht einfach an, entpuppt sich bei genauerer Betrachtung aber als anspruchsvoller als gedacht. Die Erde umrundet die Sonne näherungsweise auf einer Kreisbahn, und unsere Perspektive, aus der wir die Sonne sehen, scheint deshalb mehr oder weniger statisch. Ohne das Wissen um die Ausdehnung der Sonne fehlt uns die für eine direkte Messung notwendige Bezugsgröße.

Daher greifen Astronomen zu einem Trick. Sie bestimmen stattdessen zu unterschiedlichen Zeitpunkten die Abstände der Erde zu den anderen inneren Planeten, also zu Merkur, Venus und Mars. Laufzeitmessungen gebündelter Radarpulse, die von den Oberflächen dieser Planeten reflektiert werden, erlauben heute eine Genauigkeit von wenigen Metern. Die Messungen liefern präzise Bahndaten dieser Planeten einschließlich der Erde, und aus den Gesetzen der Himmelsmechanik lässt sich dann die Position der Sonne und damit auch ihr Abstand zur Erde ableiten. Vereinfacht ausgedrückt: Die Sonne sitzt aufgrund ihrer großen Masse im Zentrum aller Planetenbahnen.

Und so erhält man für die Astronomische Einheit einen Wert von knapp 150 Millionen Kilometern. Das Licht, das in einer Sekunde rund 300.000 Kilometer zurücklegt, braucht für diese Strecke etwa 8 Minuten und 20 Sekunden.

Stufe 2: Der Parallaxenwinkel

Bisher haben wir uns ausschließlich mit Entfernungen innerhalb unseres Sonnensystems beschäftigt. Die nächste Stufe der kosmischen Entfernungsleiter wird es uns erlauben, uns auch ein Bild von der näheren Umgebung unseres Heimatsterns zu machen.

Diese zweite Stufe beruht auf dem sogenannten Parallaxeneffekt. Jeder von euch kennt den Parallaxeneffekt aus eigener Erfahrung. Blickt ihr aus einigen Metern Entfernung zum Beispiel auf einen Laternenpfahl und schließt abwechselnd das linke und das rechte Auge, dann scheint sich der Pfahl vor weiter entfernten Objekten im Hintergrund jeweils ein kleines Stück zu verschieben. Unsere Augen sehen den Pfahl nämlich aus etwas verschiedenen Perspektiven. Die optischen Achsen des linken und des rechten Auges verlaufen nicht parallel, sondern schließen einen kleinen Winkel, den sogenannten Parallaxenwinkel, ein, so dass sie sich auf dem Pfahl treffen. Das räumliche Sehen beruht darauf, dass unser Gehirn aus diesen beiden aus leicht unterschiedlichen Winkeln aufgenommenen Bildern die zugehörige Tiefeninformation berechnet.

Während wir nun auf der Erde die Sonne umrunden, blicken wir ebenfalls von unterschiedlichen Orten aus ins All. Und genau, wie sich der Laternenpfahl vor seinem Hintergrund verschiebt, verändern auch Sterne in geringerer Entfernung ihre Position am Himmel vor dem Hintergrund weit entfernter Sterne und Galaxien. Den größten Effekt erzielen wir mit Beobachtungen im zeitlichen Abstand eines halben Jahres. Dann nämlich befindet sich die Erde genau an zwei einander gegenüberliegenden Punkten ihrer Bahn, entsprechend einem Abstand im Raum von zwei Astronomischen Einheiten. So lassen sich die Entfernungen zu Objekten in der Nachbarschaft unserer Sonne über einfache Geometrie ermitteln.

Allerdings befindet sich schon der nächste Nachbar unserer Sonne, Proxima Centauri, mit rund 4-ein-Viertel Lichtjahren oder etwa 40 Billionen Kilometern in so großer Entfernung, dass die beobachtbaren Positionsänderungen winzig sind. Sie erfordern die Bestimmung von Winkeln, die nur Bruchteile einer Bogensekunde betragen. Eine Bogensekunde ist der 3.600-ste Teil eines Winkelgrades. Wegen der hohen, erforderlichen Genauigkeit versagt diese geometrische Methode

der Entfernungsmessung bei erdgebundenen Teleskopen, wenn Sterne weiter entfernt sind als etwa 300 Lichtjahre. Grund dafür sind atmosphärische Störungen, die die Bilder verschwimmen lassen. Mit Weltraumteleskopen wie dem europäischen Astrometriesatelliten Gaia lässt sich der Anwendungsradius dieser Methode aber bis auf rund 10.000 Lichtjahre ausdehnen.

Stufe 3: Cepheiden

Die Distanz, die Licht in 10.000 Jahren zurücklegt, erscheint im ersten Moment gewaltig und durchaus beeindruckend. Das Licht, das uns von dort heute erreicht, hat sich auf den Weg gemacht, als Menschen gerade erst begannen, in größerer Zahl sesshaft zu werden. Vergegenwärtigt man sich aber, dass schon unsere Heimatgalaxie einen geschätzten Durchmesser von 200.000 Lichtjahren hat, wird klar, dass es weiterer Stufen auf der kosmischen Entfernungsleiter bedarf, um sich auch ein Bild von größeren Strukturen machen zu können.

Anfang des 20. Jahrhunderts wurde die US-amerikanische Astronomin Henrietta Swan Leavitt bei der Auswertung von Teleskopaufnahmen der Kleinen Magellanschen Wolke auf eine besondere Sorte von pulsationsveränderlichen Sternen aufmerksam. Diese sogenannten Cepheiden ändern ihre Leuchtkraft in einem streng periodischen Muster, wobei der Abstand zwischen zwei Intensitätsmaxima einige Tage bis einige Wochen beträgt. Leavitt entdeckte 1912, dass es einen systematischen Zusammenhang zwischen der Helligkeit dieser pulsierenden Sterne und der Periode ihrer Helligkeitsschwankungen gibt. Auf einen einfachen Nenner gebracht: Je länger die Pulsationsdauer, desto größer die maximale Helligkeit. Da alle Cepheiden in der Kleinen Magellanschen Wolke etwa gleich weit von uns entfernt sind, konnte Leavitt aus ihren Daten ablesen, wie maximale Leuchtkraft und zugehörige Pulsationsdauer verschiedener Cepheiden relativ zueinander in Beziehung stehen. Was noch fehlte, um diese Perioden-Leuchtkraft-Beziehung zur Entfernungsmessung einsetzen zu können, war das Wissen um die absolute Helligkeit, mit der die Cepheiden strahlen.

Ein Jahr später, 1913, gelang es dem dänischen Astronomen Ejnar Hertzsprung, Leavitts Perioden-Leuchtkraft-Beziehung zu eichen. Er machte einige Cepheiden ausfindig, die uns nahe genug sind, um ihre Entfernung mithilfe des Parallaxeneffekts bestimmen zu können. Da die Intensität der von einem Stern ausgehenden Strahlung mit dem Quadrat der Entfernung zu ihm abnimmt, konnte Hertzsprung aus der Entfernung für diese Cepheiden ihre jeweilige absolute Leuchtkraft berechnen. Über die Messung der Periodendauer kann man nun jedem Cepheiden seine absolute Leuchtkraft zuordnen. Und aus dem Vergleich dieser absoluten Leuchtkraft mit der auf der Erde beobachteten Helligkeit kann die Entfernung des entsprechenden Cepheiden berechnet werden.

Die Bestimmung von Entfernungen mit der Cepheiden-Methode funktioniert mit weltraumgestützten Teleskopen wie Gaia in einem Radius von bis zu 100 Millionen Lichtjahren. Das macht klar, dass Cepheiden über eine recht beachtliche Leuchtkraft verfügen müssen, um auch auf solche Distanzen noch gesehen zu werden. So strahlen sie etwa 1.000- bis 10.000-mal so viel Licht ab wie unsere Sonne.

Stufe 4: Supernovae vom Typ Ia

Die ersten drei Stufen der kosmischen Entfernungsleiter erlauben es uns also, Entfernungen in einem Umkreis von bis zu 100 Millionen Lichtjahren zu bestimmen. Innerhalb dieser Sphäre finden sich bereits Tausende von anderen Galaxien; unter anderem auch der Virgo-Superhaufen, der allein aus mindestens 1.300 Einzelgalaxien besteht. Was aber, wenn die Entfernungen, die wir bestimmen wollen, nicht mehr in Millionen, sondern in Milliarden Lichtjahren gemessen werden müssen?

Dann benötigen wir, anknüpfend an die Cepheiden-Methode, ganz offensichtlich Emissionsquellen, die ebenfalls eine genau bezifferbare Menge an Licht abstrahlen, dabei aber deutlich heller sind als Cepheiden. Und tatsächlich hält das Universum eine Klasse solcher Lichtquellen bereit: Supernovae, genauer gesagt, Supernovae vom Typ Ia.

Es gilt heute als relativ gesichert, dass es sich bei Supernovae vom Typ Ia um Weiße Zwerge vom Kohlenstoff-Sauerstoff-Typ handelt, die in einer thermonuklearen Reaktion explodieren. Dabei ist der Ausgangspunkt ein Doppelsternsystem, in dem sich ein Weißer Zwerg und ein Roter Riese so dicht umkreisen, dass der Weiße Zwerg kontinuierlich Material von seinem Begleiter abzieht. Seine Masse nimmt dabei zu, und er nähert sich der sogenannten Chandrasekhar-Grenze, die etwa 1,4 Sonnenmassen beträgt. Bei Annäherung an diese kritische Masse wird er zunehmend instabil, und seine Dichte steigt immer schneller an. Schließlich überschreitet die Dichte einen kritischen Wert, und es zündet eine thermonukleare Reaktion, bei der in Sekundenbruchteilen der gesamte Vorrat an Kohlenstoff vor allem zu Nickel umgesetzt wird.

Da die Masse, bei der dies geschieht, so genau definiert ist, gibt es auch nur geringe Schwankungen bei der freigesetzten Energie. Supernovae vom Typ Ia stellen somit eine Art kosmischer Standardkerzen dar, und die resultierende absolute Leuchtkraft ist im Maximum etwa 5 Milliarden Mal so groß wie die der Sonne. Genau das also, was wir brauchen.

Die Bestimmung der Entfernung einer solchen Supernova vom Typ Ia erfolgt, genau wie bei den Cepheiden, durch Vergleich der auf der Erde beobachteten Helligkeit mit der absoluten Leuchtkraft. Und diese absolute Leuchtkraft konnte ermittelt werden, indem Supernovae ausgewertet wurden, die sich innerhalb des Anwendungsradius der Cepheiden-Methode ereignet haben.

Stufe 5: Die kosmologische Rotverschiebung

Im Prinzip sind wir nun in der Lage, Entfernungen bis an den Rand des sichtbaren Universums zu bestimmen. Einen kleinen Haken hat die Sache aber noch. Wir sind abhängig von Supernovae vom Typ Ia, die vergleichsweise seltene Ereignisse darstellen. Wollen wir die Entfernung zu einem beliebigen, sichtbaren Objekt ermitteln, müssen wir uns von dieser Abhängigkeit befreien.

Dies gelingt mithilfe der sogenannten kosmologischen Rotverschiebung. Die kosmologische Rotverschiebung beruht auf der Expansion des Raumes und ergibt sich unmittelbar aus den Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Sie ist grundsätzlich von der Rotverschiebung durch den Doppler-Effekt zu unterscheiden, die durch eine relative Bewegung zwischen Strahlungsemitter und Beobachter verursacht wird. Die Expansion des Universums darf also nicht so verstanden werden, dass sich Galaxien in der Raumzeit im Sinne einer Relativbewegung voneinander entfernen würden.

Erfahrungsgemäß ist es für Laien schwer verständlich, wie die Distanzen zwischen den Galaxien größer werden können, ohne dass sich diese dabei in der Raumzeit bewegen. Stellt euch deshalb einen Hefeteig vor, in den Rosinen eingebettet sind. Der Hefeteig entspricht dabei dem Raum, die Rosinen den Galaxien. Geht der Hefeteig nun auf, werden die Abstände zwischen den Rosinen größer. Dabei bewegen sich die Rosinen aber nicht aktiv; jede einzelne Rosine ist fest an ihrem Platz in der Teigmatrix verankert. Das Teigvolumen zwischen den Rosinen wird einfach größer.

Genauso verhält es sich auch mit dem Universum: Expandiert der Raum, nehmen die Distanzen zwischen den Galaxien zu, ohne dass sich die Galaxien dabei in der Raumzeit bewegen. Einer elektromagnetischen Welle aber, die sich frei durch den sich ausdehnenden Raum ausbreitet, wird diese Expansion direkt aufgeprägt. Vergrößert sich der Raum während der Laufzeit der Welle um einen gewissen Faktor, geschieht dies im selben Verhältnis auch mit der Wellenlänge des Lichts.

Natürlich muss auch die kosmologische Rotverschiebung geeicht werden. Dazu kombiniert man die relative Leuchtkraft von Supernovae vom Typ Ia einerseits mit deren Emissionsspektren andererseits. Die relative Leuchtkraft liefert die Information über die Entfernung, charakteristische Emissionslinien in den Spektren die Information über das Ausmaß der Rotverschiebung.

Addendum: Der Doppler-Effekt

Neben der kosmologischen Rotverschiebung nimmt auch der Doppler-Effekt einen wichtigen Platz in der Astronomie ein. Nur eben nicht im Zusammenhang mit der Messung von Entfernungen.

So können mit Hilfe des Doppler-Effekts zum Beispiel Rotationskurven von Galaxien bestimmt werden. Astronomen bekommen auf diese Art Informationen darüber, wie schnell Sterne in einem bestimmten Abstand vom galaktischen Zentrum um dieses kreisen.

Und auch die Relativbewegungen von Galaxien innerhalb lokaler Cluster lassen sich mit dem Doppler-Effekt messen. Nur deshalb wissen wir, dass sich die Andromeda-Galaxie mit mehr als 100 Kilometern pro Sekunde auf uns zubewegt. Was in etwa 5 Milliarden Jahren zu einem ziemlichen Durcheinander führen wird.

Vielleicht schaut dann eine intelligente Spezies von irgendwo anders im Universum zu uns herüber und staunt und fragt sich, wie weit das wohl entfernt sein mag, dieses außergewöhnliche Schauspiel zweier verschmelzender Galaxien, dort am Firmament.

Schlussformel

In diesem Sinne: Bleibt neugierig!

Mensch macht Klima. Klima macht Mensch.

Der Mensch entlässt große Mengen an Treibhausgasen in die Atmosphäre, die globale Durchschnittstemperatur steigt. Doch menschliches Handeln beginnt bereits lange vor der industriellen Revolution, sich auf das Gleichgewicht auf unserem Planeten auszuwirken.

Das Prinzip des Gleichgewichts

Allen spontan ablaufenden Vorgängen in der Natur liegt ein gemeinsames Prinzip zugrunde: Das Prinzip des Gleichgewichts. Egal, ob beim Ausgleich der Temperaturen unterschiedlich warmer Körper, bei der gleichmäßigen Durchmischung von Flüssigkeiten und Gasen, oder im Inneren eines Sterns, wo sich Gravitationskraft und Strahlungsdruck gerade die Waage halten. Immer strebt die Natur einem Gleichgewichtszustand zu.

Und das Prinzip des Gleichgewichts gilt keineswegs nur in der unbelebten Natur. Auch belebte Systeme werden von ihm auf vielfältige Art und Weise geprägt und geformt. Wie etwa, wenn sich die Populationen von Räubern und Beutetieren dynamisch beeinflussen. Werden die Räuber beispielsweise durch eine Krankheit dezimiert, kann sich ihre Beute ungebremst vermehren. In Folge finden die überlebenden Räuber Nahrung im Überfluss. Wodurch ihre Zahl zunehmen kann, was die Population der Beutetiere wieder begrenzt. Das System pendelt sich ein.

Störungen, egal ob in belebter oder unbelebter Natur, zwingen das jeweilige System immer zu einer Antwort und haben Folgen für das Ganze.

Jingle

[Schluss leiser und mischen mit]

Ihr hört Bento. Naturwissenschaft, Technik, Gesellschaft. Ich bin Jörg-Martin Batke.

Das System Erde

So, wie es ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Räubern und Beutetieren gibt, stehen auch wir Menschen mit dem System Erde und seinen Ressourcen in vielfältigen Wechselbeziehungen und Abhängigkeiten. Jede einzelne der zahlreichen menschlichen Populationen und Gesellschaften hat sich und ihr Verhalten an die Bedingungen ihres jeweiligen Lebensraumes angepasst.

Prägen wir unserem Planeten nun eine Störung auf, wie wir das mit der Emission großer Mengen an Treibhausgasen gerade tun, beginnen unweigerlich zahlreiche Größen im System, sich zu verändern. Der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur ist die Störung eines funktionierenden Gleichgewichts. Und alle Teilsysteme, auf die die Temperatur einen Einfluss hat, ob direkt oder mittelbar, beginnen, sich in Richtung eines neuen Gleichgewichts zu entwickeln.

Dabei ist nicht die Veränderung des Klimas als solche problematisch, denn die Erde blickt auf eine durchaus wechselvolle Vergangenheit zurück. Und es mag den einen oder anderen überraschen, dass wir uns erdgeschichtlich gerade in einem Eiszeitalter befinden; einem sogenannten Interglazial, einer Zwischeneiszeit, um genau zu sein. Die meiste Zeit war es auf der Erde deutlich wärmer als heute, in der Spitze bis zu 18°C über dem vorindustriellen Niveau. Es ist also nicht die Erde an sich, die dabei Schaden nimmt. Und auch die Entwicklung und Evolution des Lebens allgemein hat von höheren

Durchschnittstemperaturen eher profitiert. Nicht ohne Grund zählen die tropischen Ökosysteme zu den artenreichsten auf unserem Planeten.

Die Benennung des Problems

Nein, problematisch ist vielmehr der Umstand, dass sich mit dem Klima natürlich auch die Lebensräume wandeln. Und viele der heute existierenden Arten werden mit den veränderten Bedingungen und vor allem der Geschwindigkeit, mit der sich diese vollziehen, nicht zurechtkommen. Das Leben wird sich anpassen, kein Zweifel. Zahlreichen Lebensformen aber wird diese Anpassung nicht gelingen, sie werden verschwinden. Und wir Menschen verdrängen allzu leicht, dass ein solches Schicksal sehr wohl auch uns selbst treffen kann. Dass unsere Spezies zu solcher Blüte gelangt ist, verdanken wir der relativen Stabilität unserer Umwelt. Woran die gemäßigten Temperaturen einen erheblichen Anteil haben.

Um besser verstehen und einordnen zu können, wie gravierend der menschliche Einfluss das Klima auf der Erde verändert, ist es hilfreich, einen Blick auf die Faktoren zu werfen, die unser Klima bestimmen.

Die Sonne

Da ist an erster Stelle natürlich die Sonne zu nennen. Denn alle Energie, die die Oberfläche der Erde wärmt, kommt letzten Endes von ihr. Und wir haben es mit unserem Zentralstern gut getroffen; er versorgt uns gleichmäßig und verlässlich mit Licht und Wärme. Aber auch die Sonne altert, und ihre Leuchtkraft verändert sich im Laufe der Zeit. So hat sie kurz nach ihrer Entstehung nur mit etwa 70 Prozent der Intensität gestrahlt, die wir heute beobachten.

Die Sonne gewinnt ihre Energie, indem sie in ihrem Kern, wo Druck und Temperatur ausreichend hoch sind, Wasserstoff, also freie Protonen, zu Helium verbindet. Und auch, wenn diese Umwandlung sehr gemächlich vonstattengeht – ein Proton braucht im statistischen Mittel rund 10 Milliarden Jahre, bis es mit einem anderen Proton fusioniert –, nimmt die Konzentration an verfügbaren Protonen doch langsam ab. Und damit auch die Wahrscheinlichkeit, dass sich bei gegebenem Druck und gegebener Temperatur zwei Protonen vereinigen. Dadurch verschiebt sich das Gleichgewicht zwischen Strahlungsdruck und Gravitationskraft im Kern langsam und kontinuierlich zugunsten der Gravitation. Der Kern wird im Laufe der Zeit kompakter, dichter und heißer. Je heißer aber der Kern, desto größer der Druck, der von innen auf die Hüllschichten der Sonne wirkt, was diese langsam aufbläht. Die Oberfläche der Sonne wird also stetig größer, während ihre Oberflächentemperatur dabei relativ konstant bleibt. Ungefähr alle 150 Millionen Jahre steigt ihre Leuchtkraft so um etwa 1 Prozent an.

Dieser langsamen aber stetigen Zunahme an abgestrahlter Energie sind noch kleinere Schwankungen überlagert. So zum Beispiel die Aktivität der Sonnenflecken mit einer Periode von ungefähr 11 Jahren sowie nicht-zyklische Strahlungsausbrüche, sogenannte Sonneneruptionen oder Flares.

Die Dynamik der Erdbewegung

Neben der Menge an Energie, die die Sonne abstrahlt, ist natürlich von zentraler Bedeutung, wieviel davon auf der Erde ankommt und wo. Beeinflusst wird die Einstrahlung vom mittleren Abstand zwischen Erde und Sonne, vom Grad der Verformung der Erdbahn zu einer Ellipse und deren Exzentrizität und von der Schräglage der Erdachse.

Uns Menschen, denen in kosmischen Zeiträumen gesehen nur ein kurzes Leben geschenkt ist, erscheinen die Bewegungen der Planeten um die Sonne außerordentlich stabil. Tatsächlich interagieren die Massen im Sonnensystem aber. Diese interplanetare Wechselwirkung führt zu einem

Austausch von Drehimpuls zwischen den beteiligten Massen und verändert die Planetenbahnen, auch die Bahn der Erde. Form und Exzentrizität sind nicht konstant, und die dabei wirkenden Anziehungskräfte lassen die ohnehin schon schräg stehende Erdachse taumeln. Bei näherer Betrachtung zeigt sich, dass diese Veränderungen des Erdorbits keineswegs chaotisch ablaufen. Vielmehr scheinen sich mehrere, periodische Einzelmuster zu einem resultierenden Ganzen zu überlagern.

Der serbische Bauingenieur und Geowissenschaftler Milutin Milanković versuchte als erster, den Einfluss dieser orbitalen Zyklen auf das Klima der Erde zu beschreiben. 1920 veröffentlichte er hierzu das Manuskript „Mathematische Theorie der thermischen Phänomene verursacht durch Solarstrahlung“. Milanković wollte mit seiner Theorie eine Verbindung zwischen dem Strahlungshaushalt der Erde und den in der jüngeren Vergangenheit aufgetretenen Eiszeiten herstellen. Auch, wenn wir heute wissen, dass Unterschiede im Strahlungshaushalt der Erde nicht als alleinige Begründung für die Eiszeiten herangezogen werden können, werden der mögliche Einfluss der orbitalen Zyklen und ihr periodisches Auftreten noch heute als Milanković-Zyklen bezeichnet. Tatsächlich sieht es so aus, als würden diese Variationen im Strahlungshaushalt Trends vorgeben, die dann durch Sekundärprozesse verstärkt werden. Solche Sekundärprozesse können beispielsweise die verstärkte Freisetzung oder Bindung von Treibhausgasen sein. Oder aber auch eine Änderung der Albedo, also des Rückstrahlvermögens der Erde, wie sie sich etwa aus der Bildung oder dem Abschmelzen von Eisschilden ergibt.

Eine erste Erkenntnis

Bis hierher haben wir uns nur mit direkter Sonneneinstrahlung beschäftigt. Wäre sie der maßgebliche Treiber des Klimas auf unserem Planeten, müsste sich die Erde im Verlaufe ihrer Geschichte langsam aber kontinuierlich immer weiter erwärmt haben. Grund ist die zunehmende Leuchtkraft der Sonne. Diesem Trend zu einer kontinuierlichen Erwärmung wären daneben die Schwankungen überlagert, die sich aus den Variationen des Erdorbits ergeben.

Vergleicht man nun aber die Klimageschichte der Erde mit den Intensitäten des jeweils direkt auftreffenden Sonnenlichts, stellt man sehr schnell fest, dass diese beiden Aspekte vielfach nicht korrelieren. Strahlungshaushalt und Oberflächentemperaturen entwickeln sich oft völlig unterschiedlich. Es muss also weitere Faktoren geben, die das Klima auf der Erde massiv beeinflussen; um nicht zu sagen, die es dominieren.

Der Treibhauseffekt

Insbesondere der Umstand, dass die Erde bereits in ihrer Frühphase Perioden sehr warmen Klimas erlebt hat, deuten darauf hin, dass es einen Mechanismus geben muss, der Wärme zurückhalten kann. Wir suchen also etwas, das der Sonnenstrahlung zwar erlaubt, die Erdoberfläche zu erwärmen, gleichzeitig aber verhindert, dass die von der erwärmten Erde abgegebene Infrarotstrahlung ungehindert entweicht.

Und wir werden fündig: Infrarotaktive Moleküle in der Atmosphäre lassen das kurzwelligere, sichtbare Sonnenlicht passieren, wechselwirken aber mit der langwelligeren Wärmestrahlung. Sie nehmen diese, von der Erdoberfläche kommend, auf, um sie kurze Zeit später wieder abzugeben. Und zwar in einer völlig beliebigen Richtung. So wird ein Teil der Wärmestrahlung zur Erde zurückreflektiert. Diese infrarotaktiven Moleküle nennen wir Treibhausgase.

Die drei wichtigsten Treibhausgase sind Wasser, Kohlendioxid und Methan. Und zwar genau in dieser Reihenfolge. Wasser allein trägt, abhängig von den lokalen Umgebungsbedingungen, zwischen 35 und 70 Prozent zum Gesamteffekt bei. Diese enorme Schwankungsbreite liegt daran, dass zum einen

die Aufnahmefähigkeit der Atmosphäre für Wasser mit der Lufttemperatur steigt, und zum anderen auch die Verdunstungsrate umso höher ist, je wärmer das ozeanische Oberflächenwasser wird. Alle drei Gase kommen in der Natur auch unabhängig vom Menschen vor.

Neben dem menschengemachten Treibhauseffekt gibt es also auch einen natürlichen. Und der hat es in sich: Unter den derzeit herrschenden Bedingungen hebt der natürliche Treibhauseffekt die durchschnittliche Temperatur auf der Erde um ganze 33°C an. Ohne diesen Effekt wäre die Erde eingefroren, bei einer mittleren Oberflächentemperatur von nur rund -18°C. Leben in der uns vertrauten Form wäre an einem solchen Ort nicht möglich. Der Treibhauseffekt an sich ist also nichts Schlechtes, wir verdanken ihm unsere Existenz. Gleichzeitig zeigt dies aber auch, dass Treibhausgase einen extrem wirksamen Hebel darstellen, um ins Klima der Erde einzugreifen. Ein Hebel, den wir gerade mit großem Nachdruck betätigen.

Quellen von Treibhausgasen

Neben den Ozeanen als Quelle für den atmosphärischen Wasserdampf hat der Vulkanismus den größten Einfluss auf den natürlichen Treibhauseffekt. Vulkanische Eruptionen setzen gewaltige Mengen an Kohlendioxid frei. So bedrohlich sich das für uns Menschen auch anhören mag – beim Begriff Kohlendioxid zucken wir inzwischen ja unwillkürlich zusammen –, so wichtig ist dieser Umstand doch für die Erde. Der Atmosphäre wird nämlich ständig Kohlendioxid entzogen. Und dies nicht in erster Linie, wie man vielleicht annehmen würde, durch das Wachstum von pflanzlicher Biomasse. In geologischen Zeiträumen stellt die Verwitterung von Silikatgesteinen die größte Kohlenstoffsенke dar. Diese Verwitterung schreitet umso schneller voran, je wärmer und feuchter es ist, so dass Landmassen und vor allem Gebirge in tropischen Klimazonen diesen Prozess besonders antreiben. Trifft daher ausgeprägte Verwitterung von Silikatgesteinen mit stark verminderter vulkanischer Aktivität der Erde zusammen, führt dies fast unweigerlich zu einer Abkühlung des globalen Klimas. Kurzfristig bewirken allerdings auch die Vulkane selbst eine Abkühlung: Sie emittieren nämlich nicht nur das erwähnte Kohlendioxid, sondern auch Schwefeldioxid. Dieses reagiert in der Atmosphäre zu Schwefelsäureaerosolen, die gemeinsam mit der vulkanischen Asche eine kurzzeitige Abkühlung des Erdklimas bewirken.

Methan schließlich entsteht überall dort, wo sich organisches Material unter Luftabschluss zersetzt. Natürlicherweise zum Beispiel in Sümpfen, Mooren und den Sedimenten auf dem Grund von Gewässern. Aber auch im Verdauungsapparat vieler Tierarten. An menschengemachten Methanquellen sind vor allem der Nassreisanbau sowie die Massentierhaltung zu nennen.

Der frühe anthropogene Einfluss

Vor rund 8000 Jahren begann der Mensch in verstärktem Maß, im Zuge seiner Sesshaftwerdung Wälder abzuholzen und zu brandroden. Wald war auf der Nordhalbkugel die dominierende Vegetationsform, doch der Bedarf an freien Flächen als Acker- und Weideland wuchs stetig. Und als Bau- und Werkstoff war Holz ebenso unentbehrlich wie als Brennmaterial. Anfangs waren es nur kleine Inseln offenen Geländes, die sich vor allem an den Ufern von Flüssen und Seen ausbreiteten. Im Laufe der Zeit aber begann Freiland die Landschaft zu prägen. Die Worte des griechischen Geographen Strabon, der zur Römerzeit schrieb, ein Eichhörnchen könne durch die Baumwipfel von den Pyrenäen bis nach Gibraltar springen, ohne den Boden je zu berühren, lassen erahnen, wie sehr der Mensch das Gesicht seiner Umwelt dabei verändert hat.

Die Zerstörung der Wälder setzte nicht nur gewaltige Mengen an Kohlendioxid frei. Sie veränderte auch den Wasserhaushalt, an der Oberfläche wie im Boden, den die Bäume reguliert hatten. Ohne den schützenden Baumbestand war der Boden zudem der Witterung ausgesetzt. Bodenerosion machte ganze Landstriche kahl und unfruchtbar. Hatten die Bäume die Energie der Sonne noch in

Biomasse umgewandelt und temperatenausgleichend gewirkt, konnte der nackte Boden sich und seine Umgebung jetzt ungebremst aufheizen.

Vor etwa 5000 Jahren dann etablierte der Mensch eine weitere, klimarelevante Verhaltensweise. In Asien begann Reis, zum Grundnahrungsmittel zu werden. Reis wird überwiegend im Nassreisanbau kultiviert, also auf Feldern, auf denen das Wasser steht. Im feuchtwarmen Klima, in dem Reis gedeiht, werden die Felder so zur Quelle großer Mengen an Methan.

2003 publizierte der US-amerikanische Geologe und Klimaforscher William Ruddiman die These, dass bereits diese frühen Eingriffe des Menschen das Klimagleichgewicht auf der Erde spürbar verschoben hätten. Er macht Abweichungen der atmosphärischen Kohlendioxid- und Methangehalte von den Erwartungswerten aus, wie sie sich aus dem Verlauf der vergangenen 350.000 Jahre ergeben würden. Beim Kohlendioxid sei diese ungewöhnliche Zunahme seit Beginn der Abholzung von Wäldern vor 8000 Jahren zu beobachten, beim Methan seit der Etablierung des Nassreisanbaus vor 5000 Jahren. Gestützt sieht er seine These dadurch, dass dieser Trend zu erhöhten Kohlendioxid- und Methangehalten jeweils parallel mit dem Auftreten globaler Seuchen wie etwa der Beulenpest gebrochen zu werden scheint. Dann nämlich brach die Bevölkerungszahl signifikant ein, was sich in einem entsprechenden Rückgang menschlicher Aktivitäten widerspiegelte. Die Natur eroberte sich Flächen zurück, und die Atmosphärengehalte an Kohlendioxid und Methan sanken.

Nach dem Ende der letzten Eiszeit vor rund 11.700 Jahren pendelte sich die globale Durchschnittstemperatur relativ zügig in etwa auf dem vorindustriellen Niveau ein. Da wir uns, wie bereits erwähnt, in einem Interglazial, einer Zwischeneiszeit befinden, bezeichnen Klimaforscher die vergangenen 10.000 Jahre daher mitunter auch als „langen Sommer“. Ruddiman vermutet, dass die menschlichen Eingriffe verhindert haben, dass sich das Klima wieder abkühlen konnte. Global geht er von einem temperaturerhöhenden Effekt von rund 0,8°C aus, in hohen Breiten sogar von bis zu 2°C.

Das führt zu einer höchst spannenden Frage: War es womöglich nicht der „lange Sommer“, der den Siegeszug der Landwirtschaft und damit den Aufstieg unserer Spezies ermöglicht hat? War es vielleicht umgekehrt? Hat der Siegeszug der Landwirtschaft diesen „langen Sommer“ bewirkt und damit die Voraussetzungen für den beispiellosen Aufstieg der Menschheit geschaffen?

Fazit

Ruddimans These wird unter Klimaforschern kontrovers diskutiert. Doch selbst, wenn er Recht haben sollte, und der Mensch hätte unbeabsichtigt dazu beigetragen, seinen eigenen Aufstieg zu befördern, was würde das für unsere gegenwärtige Situation bedeuten?

Mit der massenhaften Emission von Treibhausgasen bringen wir ein fein austariertes System aus dem Gleichgewicht. Die Erde wird darauf antworten, die Naturgesetze lassen ihr gar keine andere Wahl. Da wir Menschen uns aber angepasst haben, jede Population an ihr Habitat, wird diese Systemantwort zwangsläufig zu Verwerfungen führen.

Die steigenden Temperaturen werden Polkappen und Eisschilde abtauen und den Meeresspiegel steigen lassen. Millionen von Menschen werden ihren angestammten Lebensraum verlieren und Migrationsbewegungen ungekannten Ausmaßes die Folge sein. Steigende Temperaturen werden den Wasser- und Energiedurchsatz der Atmosphäre erhöhen und dadurch Zahl und Intensität von Extremwetterereignissen spürbar zunehmen lassen. Menschen werden ihr Zuhause oder gar ihr Leben verlieren, und die Zerstörung von Sachwerten und Infrastruktur wird eine neue Qualität annehmen. Klimazonen werden sich verschieben, Wind- und Meeresströmungen dadurch verändern, und mit ihnen auch die Menge und Verteilung von Niederschlägen. Es wird zu einer Umverteilung der Ressource Wasser kommen. Man mag sich kaum ausdenken, was wohl passieren würde, wenn sich

Wasser in einer der großen Industrienationen dauerhaft zur Mangelware entwickeln würde. Verteilungskämpfe würden entbrennen, Hunger und Kriege für hunderte von Millionen Menschen wären möglicherweise die Folge.

So mag menschengemachter Treibhauseffekt in der Vergangenheit vielleicht tatsächlich einen ausgleichenden, positiven Effekt gehabt haben. Heute jedoch gibt es wahrhaft gute Gründe, die Auswirkungen menschlichen Handelns auf das Klima zu begrenzen. Ein stabiles, kühlgemäßiges Klima ist das Fundament, auf dem die Menschheit steht.

Und noch ist es nicht zu spät. Aber es ist höchste Zeit, aufzuwachen!

Schlussformel

In diesem Sinne: Bleibt neugierig!