

## Liebe Leserin, lieber Leser,

NASAs Planetensuchmaschine Kepler arbeitet unermüdlich. Nicht nur, dass das Satellitenteleskop trotz eines ausgefallenen Kreisels zur Stabilisierung weiterhin schwache Sterne im Halbstundentakt photometriert, um Planetenkandidaten zu ermitteln, sporadisch gerät auch Außergewöhnliches ins Blickfeld: Supernovae. Die Lichtkurve von KSN 2011d erfasste sogar just den Moment, wo die Oberfläche des Roten Überriesen merkt, dass nichts bleibt, wie es war: Die Schockwelle durchbricht die Oberfläche des Unglückssterns, und die Explosion der Sternenhülle nimmt ihren Lauf.

Auf zwei Gedenktage ist hinzuweisen:

(a) Vor 175 Jahren, am 3. April 1841, wurde in Leipzig Hermann Carl Vogel geboren. Vogel war von 1882 an alleiniger Direktor des Astrophysikalischen Observatoriums (AOP) auf dem Potsdamer Telegrafenberg. Er starb 1907 daselbst. Direktor Vogel hatte die bahnbrechende Idee, das Spektroskop zum Zwecke der Aufzeichnung mit der noch jungen photographischen Platte zu verbinden. Das ermöglichte das Gewinnen von Spektren schwächerer Sterne. Sogleich entdeckte er die durch den Dopplereffekt bedingten Radialgeschwindigkeitsvariationen spektroskopischer Doppelsterne. Weltweit bekannt machten ihn und das AOP die Untersuchung von  $\beta$ -Persei, des „Teufelssterns“ Algol.

(b) 50 Jahre nach Hermann Carl Vogel erblickte am 22. April 1891 nahe Durham, England, Harold Jeffreys das Licht der Welt. Er starb 1989, im 98ten Lebensjahr, im Englischen Cambridge. Der Kosmos-Bote muss gestehen, dass er lange meinte, es gäbe mehrere Jeffreys, darunter einen Astronomen, einen Geophysiker (Seismologen), einen Meteorologen und einen Statistiker. Sir Harold war vielseitig – und gilt als reinrassiger Bayesianer.

In der Hoffnung, dass für jeden etwas dabei ist, wünscht eine vergnügliche Lektüre

Hans-Erich Fröhlich

## Der Himmel im April

Merkur erreicht am 18. April mit  $20^\circ$  seine größte östliche Elongation zur Sonne. Das beschert uns im zweiten Monatsdrittel eine bequeme Abendsichtbarkeit des umtriebigen Planeten etwa eine Stunde nach Sonnenuntergang. Erst am 9. Mai wird Merkur wieder zu sehen sein. Dann allerdings für  $7\frac{1}{2}$  Stunden am helllichten Tage – v o r der Sonnenscheibe.

Venus befindet sich knapp westlich der Sonne und wird am 6. April für eine  $\frac{3}{4}$  Stunde vom alten Mond bedeckt. Das Schauspiel beginnt gegen 9:30 MESZ. Wegen der Sonnennähe ist Vorsicht geboten! Neumond ist am 7. April.

Mars setzt zur Oppositionsschleife an. Am 17. des Monats wird er rückläufig. Wenige Grad östlich vom Mars pendelt Saturn. Der ist bereits rückläufig. Am 20. April nähern sich Mars und Saturn auf eine halbe Stunde in Rektaszension an. In den Morgenstunden des 25. April kommt es zu einer Begegnung des Mondes mit Mars (gr. Ares), Saturn, und dem „Gegenmars“, dem Antares.

Noch beherrscht Jupiter den Nachthimmel. Seine Oppositionsphase (Rückläufigkeit) nähert sich allerdings dem Ende. Stillstand ist am 10. Mai.

## Die „Keplersche“ Supernova von 2011

Das Raumteleskop Kepler der NASA hält nicht nur nach Exoplaneten Ausschau, die sich verraten, in dem sie das Sternenlicht beim regelmäßigen Vorübermarschieren vor dem Sternscheibchen ein wenig schwächen<sup>1</sup>. Weniger spektakulär ist die Erforschung der Oberflächenrotation von Sternen vermittels langlebiger Sternflecken. Sporadisch werden sogar Supernovaexplosionen, wie jene vom 8. November 2011, minutiös registriert. Erwischt hat es einen Roten Überriesen in einer namenlosen Galaxie in einer Entfernung von 1,2 Milliarden Lichtjahren. Der Sternenriese brachte es, bevor er explodierte, auf fast 500 Sonnenradien. Versetzt an die Stelle unserer Sonne füllte er das Planetensystem bis zur Vesta-Bahn zwischen Mars und Jupiter.

Am Ende seiner Tage baut sich im Zentrum eines massereichen Sterns durch Verschmelzung von Siliziumatomkernen ein Sternkern aus Eisenatomen auf. Wie man weiß, hat der Atomkern  $^{56}\text{Fe}$  die niedrigste Masse pro Nukleon. So ein Eisenatomkern zählt zu den kompaktesten und damit stabilsten

---

<sup>1</sup>Das Transitverfahren ist die einfachste Art, Exoplaneten aufzuspüren.

Atomkernen überhaupt. Die Bindungsenergie<sup>2</sup> pro Nukleon ist maximal. Damit hat sich der Stern in eine ausweglose Situation manövriert. Weder durch Fusion noch durch Fission (Kernspaltung) kann bei einem solchen Atomkern auch nur ein Quentchen Energie freigesetzt werden. Bei der Möglichkeit, den Energieverlust durch Abstrahlung irgendwie zu kompensieren, sackt der Eisenkern unter seinem Eigengewicht in Sekundenbruchteilen im freien Fall in sich zusammen. Was übrigbleibt, ist ein zunächst heißer Neutronenstern von über einer Sonnenmasse, ein Paar Dutzend Kilometer nur groß. Der Hauptteil der beim Kollaps zu diesem „Kügelchen“ gravitativ freigesetzten Energie verpufft als Neutrino-Blitz. (Eventuell bleiben Neutrinos sogar im Stern stecken, deponieren dort Energie und Impuls und machen so die kolossale Hülle explodieren.) Beim Rückprall des über seine Gleichgewichtslage hinaus zusammengequetschten Neutronenballs wird eine Stoßwelle ausgelöst, die wie ein Tsunami den Stern durchrast und das Material in der Stoßfront auf Hunderte Millionen Grad erhitzt, wobei jede Menge Kernreaktionen ablaufen, Neutroneneinfänge, die u. a. auch chemische Elemente jenseits des Eisens im Periodischen System der Elemente zusammenbrauen. Nach etwa einem Tag durchbricht die Schockwelle den Stern, und spätestens jetzt wird klar, der Stern ist aus den Fugen. Die Expansion der Sternenhülle und die damit einhergehende Vergrößerung der strahlenden Oberfläche nimmt ihren Lauf, was den Helligkeitsausbruch dieser Typ-II-Supernova erklärt. Es ist der Lichtblitz beim Durchbrechen der Stoßwelle durch die Sternoberfläche, den Kepler zum ersten Mal gesehen hat. Der Vorbote des Ausbruchs dauerte nur etwa 20 Minuten und erreichte ein Achtel der Maximalhelligkeit der Supernova zwei Wochen später. Der „Blitz“ war bereits in den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts vorhergesagt worden. Sein Nachweis ermutigt Supernova-Modellbauer. Nun kann man an der weiteren Verbesserung der Modelle arbeiten.

## Logik der Forschung

Harold Jeffreys war mehr als ein Wissenschaftler, er war praktizierender „Meta“-Wissenschaftler. Seiner Ansicht nach ist die folgende *D e d u k t i o n* zwar logisch, aber epistemologisch<sup>3</sup> wertlos:

---

<sup>2</sup>Kernphysiker weisen darauf hin, dass die maximale Bindungsenergie pro Nukleon bei <sup>62</sup>Ni erreicht wird.

<sup>3</sup>Epistemologie: die Lehre von der Erkenntnis.

Ein jeder Mensch ist sterblich.

Sokrates ist ein Mensch.

Also ist Sokrates sterblich.

Forschung denkt entgegengesetzt. Sie schließt *i n d u k t i v* vom Speziellen, einer Handvoll Daten, aufs Allgemeine, das Naturgesetz. Ist Forschung gar unlogisch? Nun, die Logik der Forschung, sie fand Jeffreys im Nachlass eines presbyterianischen Geistlichen. Thomas Bayes (1702–1761), ein Hobby-Mathematiker und Mitglied der Royal Society, war auf eine Formel gestoßen, die es gestattet, die Wahrscheinlichkeit einer Behauptung („Ein jeder Mensch ist sterblich.“) im Lichte empirischer Daten<sup>4</sup> zu berechnen! Um es vorwegzunehmen: An der Bayes’schen Formel für *b e d i n g t e* Wahrscheinlichkeiten ist nichts auszusetzen. Sie stimmt. Auseinander gehen die Meinungen bei der Frage ihrer Anwendbarkeit.

In der klassischen Wahrscheinlichkeitsrechnung ist Wahrscheinlichkeit eine relative Häufigkeit. Die Wahrscheinlichkeit, mit einem fairen Würfel eine „6“ zu würfeln, ist  $1/6$ . Neben der „klassischen“ gibt es eine volkstümliche Auffassung. Es ist die des Wetterberichts, der sich nicht scheut, eine Regenwahrscheinlichkeit von 10% zu prognostizieren.

Erster prominenter Vertreter dieses *e r w e i t e r t e n* Wahrscheinlichkeitsbegriffes war der Astronom und Mathematiker Pierre-Simon Laplace (1749–1827).

Der Siegeszug von Jeffreys’ Auffassung von Wissenschaft, ausgelöst und ermöglicht durch die immense Rechenleistung von Supercomputern, ist indes gefährdet: „Big Data“! Angesichts der ungefilterten Datenflut bleibt kritisches Testen von Hypothesen auf der Strecke. Korrelation ersetzt Kausalität, das Indiz den Beweis. Man kennt das von der Astrologie. Die lässt es mit dem Aufstellen von Hypothesen bewenden. Das Testen erspart sie sich.

Hier ist die Formel, die lehrt, wie man aus Erfahrung klug wird. Zur Schreibung:  $P(A|B)$  bezeichne die *b e d i n g t e* Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen des Ereignisses  $A$ , sofern sich  $B$  bereits ereignet hat. Wir betrachten einen Satz von Hypothesen, die einander logisch ausschließen:  $H_1, H_2, \dots$ . Die (Posterior-)Wahrscheinlichkeit für das Zutreffen der  $i$ -ten Hypothese  $H_i$ , nachdem die Daten  $D$  unter Annahme der Hypothese  $H_i$  begutachtet wurden, lautet:

---

<sup>4</sup>Die Behauptung, jeder Mensch sei sterblich, steht empirisch auf wackeligem Boden, wie Jeffreys befand. Tatsächlich sind von Adam und Eva bis zum heutigen Tage, von zehn Personen, nur neun definitiv gestorben!

$$P(H_i|D) = P(H_i) \cdot P(D|H_i)/P(D).$$

$P(H_i)$  ist die Wahrscheinlichkeit der  $i$ -ten Hypothese b e v o r die Daten eintrafen. Man nennt sie Prior-Wahrscheinlichkeit.  $P(D|H_i)$  bezeichnet die sog. Likelihood, eine Gütefunktion, die bemisst, wie gut die Daten zur Hypothese  $H_i$  passen, und  $P(D)$  ist die Wahrscheinlichkeit der Daten, unabhängig davon, welche der infrage kommenden Hypothesen ( $H_1, H_2, \dots$ ) zutrifft. Lernen heißt, den „Prior“  $P(H_i)$  durch den „Posterior“  $P(H_i|D)$  zu aktualisieren.

Zur Illustration das Übliche aus der medizinischen Praxis: Eine seltene Krankheit wurde diagnostiziert. Wie wahrscheinlich ist es, diese Krankheit zu haben? Angenommen, ein Prozent der Bevölkerung ist davon betroffen, dann gilt für die Prior- oder Basiswahrscheinlichkeit (Inzidenz)  $P(H_1) = 0,01$ . Weiterhin werde die Krankheit in 99% der Fälle auch als solche erkannt:  $P(D|H_1) = 0,99$ .  $P(D)$  ergibt sich daraus, dass sich die Wahrscheinlichkeiten krank bzw. nicht krank zu sein, zu 1 aufsummieren müssen. Also gilt:  $P(D) = P(H_1) \cdot P(D|H_1) + P(H_2) \cdot P(D|H_2)$ , wobei  $H_2$  die Alternative zu  $H_1$  ist, also die Gesundheitsvermutung. Es gilt  $P(H_2) = 1 - P(H_1)$ . Bei einer seltenen Krankheit ist die Wahrscheinlichkeit für einen falschen Alarm,  $P(D|H_2)$ , entscheidend. Wir nehmen hier an, in 5% aller Fälle werde die Diagnose „krank“ gestellt, obwohl der Patient gesund ist. Das Ergebnis überrascht:  $P(H_1|D) = 0,01 \cdot 0,99 / (0,01 \cdot 0,99 + 0,99 \cdot 0,05) = 1/6$ . Die Wahrscheinlichkeit, die diagnostizierte Krankheit auch zu haben, ist 1:6. Das ist zwar mehr als 1:100, schließlich hat man nicht ohne Grund die Krankheit diagnostiziert, aber noch nicht dramatisch.

Die Bayes'sche Formel offenbart ein klimapolitisches Dilemma. Dass  $\text{CO}_2$  ein Treibhausgas ist, und seine Freisetzung zur Erwärmung führt, ist unstrittig. Die Schuldfrage hingegen ist von ganz anderem Kaliber: Ein Indiz ist kein Beweis: Dass  $\text{CO}_2$  die Erde erwärmt, heißt ja nicht im Umkehrschluss, dass Erderwärmung durch  $\text{CO}_2$  verursacht ist! Ist also die gegenwärtig zu beobachtende Erwärmung noch der natürlichen Variabilität des Klimas geschuldet oder bereits menschlichem Einfluss? In Ermangelung einer statistischen Langzeitstudie über, sagen wir, 100 Erden mit und ohne rauchende Schornsteine sind Priorwahrscheinlichkeiten nur durch numerische Simulation der Klimaentwicklung von 100 Erden zu ermitteln. Das wiederum setzt voraus, dass die Klimamodelle stimmen. Klima-Skeptiker bezweifeln genau das. Vielleicht übersehen ja alle Modelle etwas Wesentliches. Kurz: Politik<sup>5</sup> muss

---

<sup>5</sup>Klimaschutzmaßnahmen verpuffen angesichts der Bevölkerungsexplosion. Um diese einzudämmen, bedarf es des Wohlstands. Der ist ohne zusätzliches  $\text{CO}_2$  kaum zu haben.

weise agieren, ohne Berufung auf die Wissenschaft!

Für Sir Harold ist jede Erkenntnis eine Art `Update`: Neue Erfahrungen bzw. wissenschaftliche Daten revidieren unser Urteil über Meinungen bzw. Hypothesen. Deren Prior-Wahrscheinlichkeit wird à la Bayes zur Posterior-Wahrscheinlichkeit, die ihrerseits beim nächsten Update als neuer Prior fungiert.

Stein des Anstoßes ist der `subjektive` Prior. So etwas ist für jemanden, für den Wissenschaft ein objektives Unterfangen ist, nicht akzeptabel.

Dazu sei folgendes angemerkt:

1. Wissenschaft ist Menschenwerk, und so etwas wie Objektivität entsteht im Streitgespräch. Jeffreys anerkannte – lange vor der modernen Soziologie –, dass Wissenschaft zwar nicht vorurteilsfrei ist, aber deshalb noch lange nicht der Beliebigkeit anheimfällt!
2. Die Erfahrung lehrt, dass aussagekräftige („gute“) Daten, Daten, die den Spielraum von Theorien merklich einschränken, selbst bei einer fehlerhaften Einschätzung der Ausgangslage, schnell die anfängliche Subjektivität vergessen machen. Die Wahrheit setzt sich durch, sofern dies der Prior zulässt. Man muss nur Meinungen, die einem nicht in den Kram passen, Raum geben. Der Physiker Richard Feynman schrieb, er billige der Astrologie eine (Prior-)Wahrscheinlichkeit von 1:1 Million zu. Sei etwas dran an ihr, vermag sie sich gegen dieses Vorurteil durchzusetzen. Die Wahrscheinlichkeit „Null“ vergeben nur Leute, die absolut von sich überzeugt sind.
3. Dank Jeffreys wissen wir, wie man Vor-Wissen, also Wissen vor der Erfahrung, korrekt formuliert.

## Jeffreys' Prior

Womit wir bei Jeffreys' „unparteiischem“ Prior wären.

Angenommen, aus einer verrauschten Zeitreihe, der Lichtkurve eines veränderlichen Sterns beispielsweise, sei eine Periode zu bestimmen. Es handele sich der Einfachheit halber um eine reine Sinusschwingung bekannter Phase und

Amplitude. Wegen des Rauschens sind prinzipiell nur Wahrscheinlichkeitsaussagen über den w a h r e n Wert der Periode möglich. Deren Wahrscheinlichkeitsverteilung liefert die Bayes'sche Formel<sup>6</sup>. Das Problem ist der subjektive Prior! Das Ergebnis, der Posterior, also die Wahrscheinlichkeitsverteilung der wahren Periode, hängt von ihm ab! Jeffreys rettet die Situation. Als Astronom weiß er, es gibt zumindest zwei Parteien. Nicht alle Astronomen bestimmen Perioden. Da gibt es Kollegen, die bevorzugen die Frequenz, also den Kehrwert der Periode, wogegen nichts einzuwenden ist. Mr. Spock vom Vulkan-Planeten des 40-Eridani-Systems, hegt gar eine Vorliebe für Logarithmen. Er ermittelte aus unserer verrauschten Lichtkurve den Logarithmus der Periode bzw. der Frequenz! Bei mehreren Parteien bleibt nur eines: Der Prior muss so gewählt werden, dass jeder, sei er Fan von Perioden, Frequenzen oder Vulkanier, bei Auswertung des gleichen Datenmaterials zu exakt den gleichen Schlussfolgerungen gelangt.

Jeffreys Prior wird dadurch zu einem o b j e k t i v e n Prior. Die Prior-Wahrscheinlichkeit fällt in unserem Beispiel umgekehrt proportional zur Periode bzw. Frequenz ab. Besonders schlau sind Vulkanier: Indem sie sich des Logarithmus bedienen, entledigen sie sich des Priors. Für sie ist er eine uninteressante Konstante.

Astronomielehrer haben ihre Mühe und Not, ihren Zöglingen die photometrische Entfernungsbestimmung über den Entfernungsmodul, der Differenz aus scheinbarer und absoluter Helligkeit, schmackhaft zu machen. Die Benutzung des Entfernungsmoduls zeugt nicht von Rückständigkeit, sie ist wegen stets vorhandener Messfehler die gescheiteste Art, eine Entfernung photometrisch abzuleiten! Sie berücksichtigt, dass man mit gleichem Recht die Parallaxe, also den Kehrwert der Entfernung, ermitteln könnte.

Nicht nur Astronomen sind geborene Bayesianer. Die Sinnesorgane der Wirbeltiere sind quasi logarithmische Empfänger. Die Basilarmembran im Innenohr beispielsweise ist wie die Klaviatur eines Keyboards annähernd logarithmisch geteilt. Dem Ohr ist offenbar daran gelegen, unparteiisch zu urteilen, sich nicht zu entscheiden zwischen Herz (Frequenz) oder Millisekunden (Periode). Logarithmen machen vorurteilsfrei!

Wie die Begründer der Psychophysik, Ernst Heinrich Weber (1795–1878) und Gustav Theodor Fechner (1801–1887) herausfanden, geht das subjektive

---

<sup>6</sup>Aufs Musikalische übertragen: Die Hypothesen sind die Tonhöhen. War es ein „c“ oder ein „cis“?

Empfinden eines Reizes (Helligkeit, Lautstärke etc.<sup>7</sup>) mit dem Logarithmus des physikalischen Reizes. Das astronomische Größenklassensystem ist nicht antik, sondern natürlich<sup>8</sup>! Akustiker messen die Lärmbelastung ebenfalls logarithmisch – in Dezibel.

---

<sup>7</sup>Auf Glücksempfindungen trifft das ebenfalls zu: 1 Euro beglückt den Armen wie 100 Euro den 100-fach Reicheren. Beide empfinden das Gleiche!

<sup>8</sup>Das stimmt nicht ganz. Man hätte den dekadischen Logarithmus seinerzeit durch den natürlichen ersetzen sollen. Das hat man versäumt.