

Publiziert in: *Mit dem Auge denken - Strategien d. Sichtbarmachung in wissenschaftlichen u. virtuellen Welten*, Hgg.: Bettina Heintz / Jörg Huber
Edition Voldemeer Zürich, Springer, Wien, New York, 2001

Das Bild als Bühne der Mustererkennung

Ein Beispiel aus der Astrophysik

Prof. Dr. Arnold Benz, M.A.
Institut für Astronomie
ETH Zürich

Das Institut für Astronomie der ETH Zürich betreibt in der Nähe von Gränichen im Kanton Aargau ein Radiospektrometer, aus dem sich täglich etwa hundert Millionen Messungen in die Computerspeicher ergiessen. Dies ist schon lange nicht mehr rekordverdächtig, denn bereits sind Computer daran, das Hundertfache an Bilddaten zu verarbeiten. Ich habe dieses Beispiel aus der Astronomie gewählt, weil die Zahlen in unserem Fall nicht einfache Lichtkurven oder räumliche Bilder sind, sondern die Variabilität der Radiostrahlung von der Sonne auf 200 – 500 Frequenzen innert Bruchteilen von Sekunden ausdrücken. Die Messungen werden gemacht, um den Einfluss der Sonne auf den erdnahen Weltraum, das Raumwetter und insbesondere magnetische Stürme und den Zustand der Ionosphäre zu untersuchen.

Das Problem

Von den hundert Millionen täglichen Messwerten sind je nach Aktivität der Sonne höchstens eine Million oft aber viel weniger, häufig gar keine für die Forschung wirklich interessant. Das Problem besteht darin, jene Zahlen auszuwählen, die uns etwas über die Ursache oder Auswirkungen von Sonneneruptionen verraten. Sie sind nicht zufällig verteilt in der Zahlenmenge, sondern bilden Gruppen und Strukturen zu gewissen Zeiten und in benachbarten Frequenzen. Von diesen „Ereignissen“ erhöhter Radiointensität wiederum sind nicht alle Typen gleich wichtig. Die einen sind längst bekannt und lassen keine weiteren Aussagen zu. Andere sind heiss begehrt von den Fachleuten, und einige wurden vielleicht noch nicht als Muster erkannt.

Die Aufgabe besteht demnach darin, bekannte Muster zu identifizieren und neue Muster zu entdecken. Wir haben Versuche gemacht, dies mit einem Computer zu lösen. Die interessante Doktorarbeit eines Informatikers kam dabei zum Schluss, dass infolge der Vielfalt der Strukturen der Computer dem kognitiven Forscher bei weitem unterlegen ist. Nun hat aber ein Tag bekanntlich nur 86'400 Sekunden, von denen ein guter Forscher nur einen kleinen Bruchteil hergibt, um die Zahlen durchzugehen. Es musste also eine Methode gefunden werden, um die riesige Zahlenmenge in wenigen Sekunden zu überblicken.

Signalerkennung

Die Messwerte des Radioteleskops werden jede Nacht von einem Computer am Institut in Zürich automatisch von der Messstation abgerufen und nach einer Eichentabelle in physikalische Einheiten von Intensität umgewandelt. Die unterschiedliche Empfindlichkeit des Instruments bei den verschiedenen Frequenzen wird dabei ausgeglichen. Am darauf folgenden Morgen können Astronomen die Daten bereits aus dem Archiv abrufen.

Zunächst muss festgestellt werden, ob überhaupt ein variables Signal der Sonne registriert wurde, das dann später beurteilt, in die Liste der Ereignisse aufgenommen oder gar im Rahmen eines Projektes ausgewertet werden soll. Seit vielen Jahren lösen wir das Problem mit einer bildlichen Darstellung.

Die Idee geht auf den Australier Paul Wild¹ im Jahre 1950 zurück. Es war damals üblich, die Messwerte als Lichtkurven darzustellen. Bei mehreren Frequenzen wurden die Lichtkurven gestaffelt übereinander gezeichnet. Dies wirkt unübersichtlich bei vielen Frequenzen, und es wird schwierig, solare Signale in den zittrigen Messkurven zu erkennen und zu beurteilen. Es gelang nun Wild, die Intensität einzelner Frequenzkanäle als helle und dunkle Bildpunkte optisch darzustellen und auf fotografischem Film festzuhalten. Die Bilddarstellung war ein Durchbruch in der Visualisierung und führte zur Taxonomie der Radioemissionen im Meterwellenbereich.

Vor 15 Jahren haben wir die Bilddarstellung an der ETH erstmals vollständig digitalisiert. Die digitale Form der Messwerte erlaubt, die Empfindlichkeit der Bilder durch einfache Manipulationen um mehr als eine Zehnerpotenz zu steigern und die Qualität wesentlich zu verbessern. Vermittelte die Umsetzung in fotografische Bilder einen fixen Überblick, der im Normalfall auf etwa einem Meter Film pro Stunde Platz fand, öffnete sich mit der Digitalisierung eine Welt von Möglichkeiten der Umsetzungen und ihrer Bilder. Im Folgenden soll die Bilddarstellung allgemein dargestellt werden und wie diese Visualisierung durch digitale Methoden einen wichtigen Schritt vorankam.

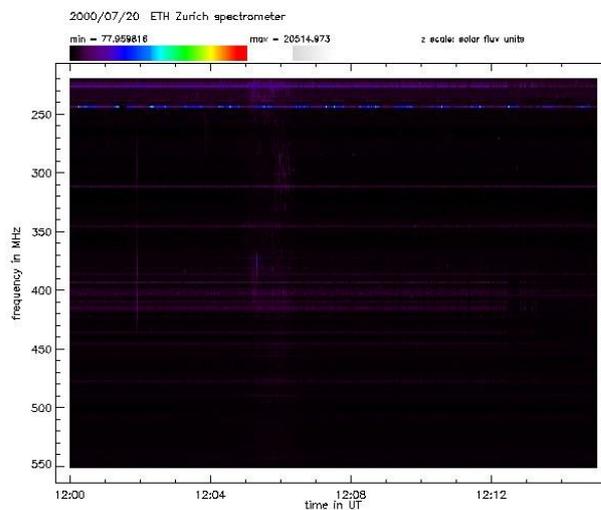


Abbildung 1: Darstellung von 1,8 Million Zahlen als Bild von Frequenz (in Megahertz) und Zeit (Weltzeit am 20. Juli 2000). Die Messwerte wurden automatisch geeicht und in Farbwerten von Schwarz (schwache Intensität), Blau, Gelb bis Rot (höchste Intensität) dargestellt.

Für die Abbildung 1 wurden die geeichten Messwerte im Bereich von 78 bis 20515 Einheiten auf die Farben des Regenbogens von Blau über Gelb nach Rot abgebildet. Eine Einheit (solar flux unit) bedeutet hier die Energieeinheit der einfallenden Strahlung pro Quadratcentimeter der Teleskopfläche, pro Frequenzeinheit und pro Sekunde. Es stehen 256 verschiedene Farbwerte zur Verfügung. Die 200 Frequenzkanäle sind zeilenweise untereinander dargestellt. Das Bild ist keine räumliche Abbildung der Sonne, sondern ein sogenanntes *Spektrogramm*. Es besteht aus 1,8 Millionen Quadraten, *Pixels* genannt, die je eine Messung auf einer Frequenz während 0,1 Sekunden darstellen. Das Bild enthält alle Pixels, die während einer Zeit von 15 Minuten registriert wurden.

Das Bild (Abb.1) ist sehr dunkel, weil die meisten Messwerte im untersten Bereich liegen. Grosse Messwerte (gelb und rot) sind so selten, dass sie nicht wahrgenommen werden. Es sind einzelne Pixel auf bestimmten Frequenzen. Sie sind meistens nicht solaren Ursprungs und werden durch Radarpulse oder von elektrischen Funken in technischen Geräten verursacht. Diese Werte tauchen in gleichzeitigen Messungen anderer Observatorien nicht auf, sind aus früheren Messungen bekannt und haben mit grosser Sicherheit nichts mit den gesuchten Mustern zu tun. Sie werden im nächsten Schritt (Abb.2) aus dem Bild entfernt und die dadurch fehlenden Messwerte aus den Nachbarpixeln interpoliert.

Auf den ersten Blick sind in Abb.1 nur horizontale Bänder erkennbar. Sie bedeuten, dass einige Frequenzgebiete intensiver sind als andere. Offenbar sind die Unterschiede trotz der Eichung noch sehr gross. Die stärksten horizontalen Streifen stammen von Radiosendern auf der Erde, die unsere Messungen stören. Sie dominieren das Bild und verdecken die gesuchten Signale, die noch kaum sichtbar sind.

Um Signale der Sonne zu erkennen, muss das Bild nun weiter behandelt werden. Die grössten Werte werden entfernt. Die weiteren Störungen sind in erster Näherung zeitlich stabil. Wir subtrahieren daher den Mittelwert der Messwerte jedes Frequenzkanals über die 15 Minuten Dauer. Die Abbildung 2 zeigt das Resultat nach diesen zwei Schritten. Die für Astronomen interessanten Strukturen von 12:04:30 bis 12:07 Weltzeit (UT) treten bereits deutlich hervor.

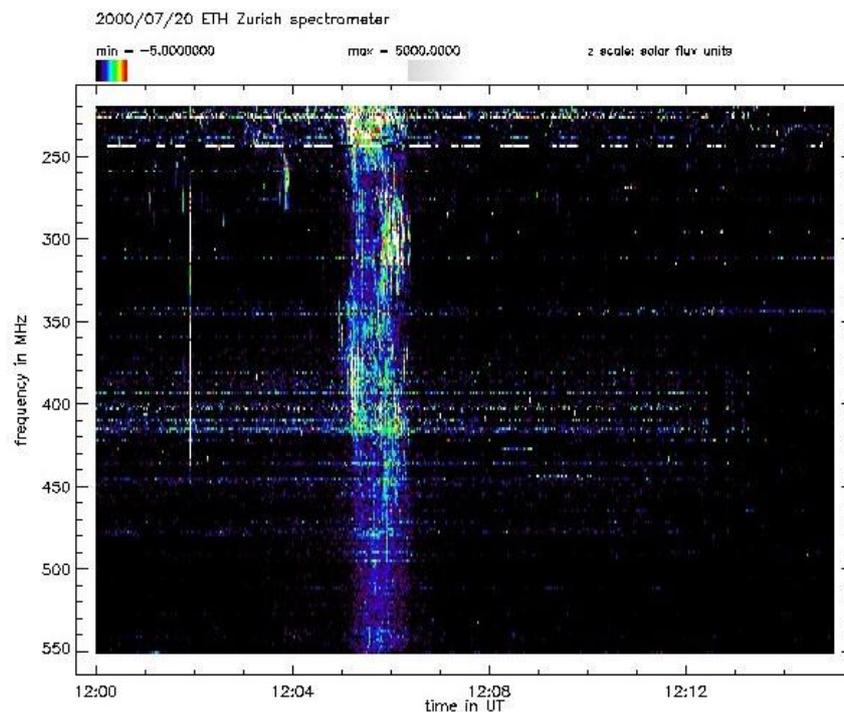


Abbildung 2: Von den Messwerten der Abbildung 1 wurde der Durchschnittswert über 15 Minuten pro Frequenzkanal abgezogen und die Höchstwerte auf 5000 Einheiten limitiert. Die Farbtabelle ist auf den unteren Bereich, von 0 bis 100 Einheiten konzentriert.

Abbildung 2 zeigt, dass immer noch horizontale Streifen vorhanden sind, weil unsere Annahme konstanter Störungen nicht ganz zutraf. Gewisse terrestrische Radiosender emittieren kurze, stark schwankende oder pulsierende Intensitäten. Im nächsten Schritt sucht der Computer nach Frequenzen mit starken Schwankungen, wie wir sie nicht über die Dauer von 15 Minuten von der Sonne erwarten. Diese Frequenzkanäle sind in der Abbildung 3 eliminiert, denn sie sind für die Sonnenforschung nicht

brauchbar. Das Bild enthält daher nicht mehr 200 Zeilen. Der Verlust fällt nicht ins Gewicht.

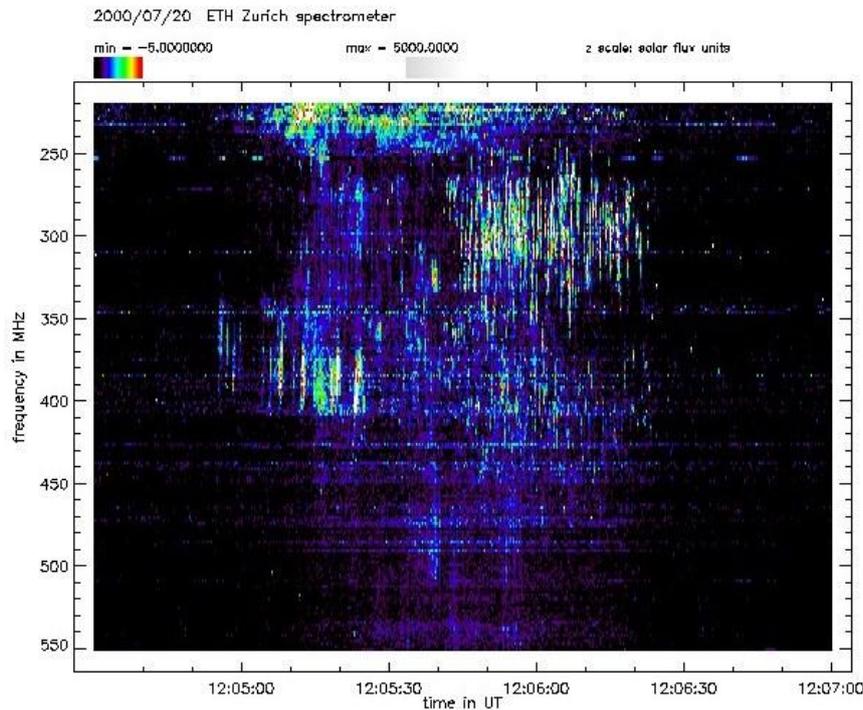


Abbildung 3: In Abbildung 2 wurden 14 stark variable Frequenzkanäle entfernt. Der Bildausschnitt wurde auf den interessanten Teil beschränkt, der die wichtigsten solaren Signale enthält.

Abbildung 3 zeigt nun vor allem Strukturen der Sonnenstrahlung. Nun sind es die stärksten Emissionen der Sonne selber, welche das Bild dominieren und schwächere Strukturen zum Verschwinden bringen. Im nächsten Schritt werden die Daten logarithmisch komprimiert. Der Logarithmus macht grosse Messwerte relativ kleiner und kleine relativ grösser. Schwache Signale und Strukturen werden auf diese Weise im Verhältnis zu den grossen hervorgehoben. Die Kompression verkleinert ferner den Zahlenbereich, so dass die Daten weniger Speicherplatz brauchen. Während in der linearen Skala mit physikalischen Einheiten die Werte im Bereich von -5 bis 5000 lagen, sind sie nach der logarithmischen Kompression noch zwischen 31 und 174.

Die Bildverarbeitung bis zur Stufe der Abbildung 4 kann ein Computerprogramm automatisch durchführen. In Abbildung 4 erkennt das geübte Auge bereits, dass neben vielen verbleibenden horizontalen Störungen und mehreren Strukturmustern ein potentiell interessantes Signal vorhanden ist. Im Intervall von 12:05:40 bis 12:06:30 UT sind bei 300 MHz impulsive Spitzen (rot) erkennbar.

Auch das Erkennen von solaren Signalen kann mit einem Computerprogramm automatisiert werden. Als die digitale Speicherung noch sehr teuer war, haben wir einen Computer die solaren Signale während der Messung suchen lassen und nur die erkannten Ereignisse überhaupt aufgezeichnet. Weil die Signalerkennung nie völlig zuverlässig war, vor allem bei schwachen Signalen, gingen viele Ereignisse verloren. Heute behalten wir alle Daten und sichten sie von Auge. Der menschliche Gesichtssinn ist ausgezeichnet befähigt, trotz Störungen gewisse Strukturen zu finden. Dabei spielt die Fähigkeit eine wichtige Rolle, einen unerwünschten Hintergrund von konstanten Störungen auszublenden und zu unterdrücken. Der Mensch kann somit schwächere Signale erkennen und hat auch heute noch eine viel kleinere Fehlerrate als ein Computer². Mit bildlichen Darstellungen lässt sich der Aufwand auf ein tragbares Mass reduzieren.

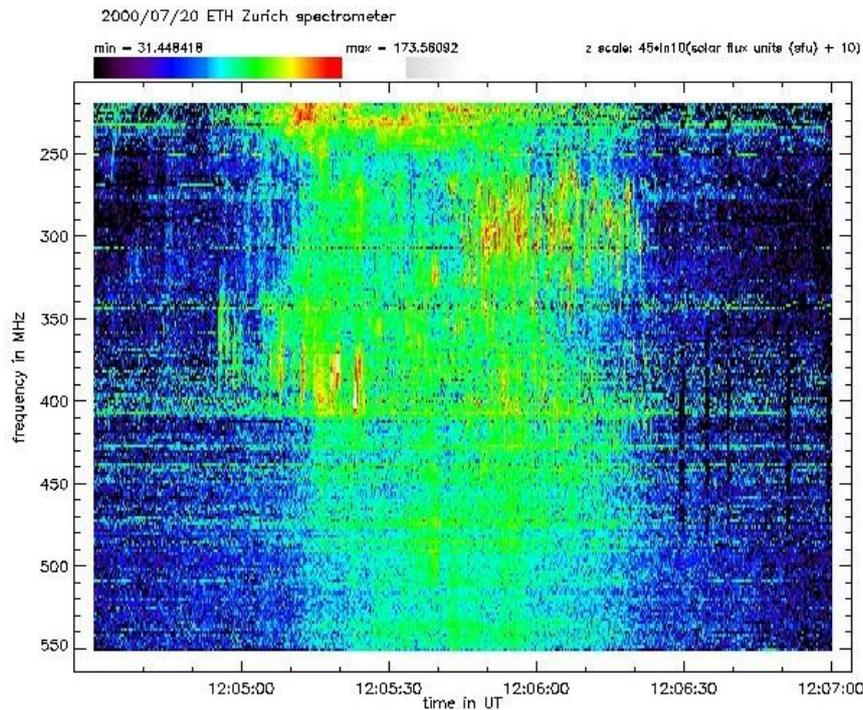


Abbildung 4: Die Abbildung 3 wurde logarithmisch komprimiert, um schwache Strukturen hervorzuheben. Die Werte liegen jetzt so, dass die Farbskala gleichmässiger ausgenutzt werden kann.

Im soeben beschriebenen Vorgang geht es um die Erkennung von Mustern. Die auswertende Person lernt anhand eindeutiger Beispiele was Störungen sind. Sie kann diese wieder erkennen, auch wenn sie z. B. schwächer sind oder von etwas anderer Art. Gleichfalls werden Radiostrahlungen der Sonne anhand von Vor-Bildern wieder erkannt. Der Vorgang der Mustererkennung soll nun näher betrachtet werden.

Mustererkennung

Im Folgenden geht es nicht mehr um die Erkennung von solaren Signalen und ihrem Unterscheiden von terrestrischen Störungen, sondern um das Differenzieren der verschiedenen Radiostrahlungen der Sonne. Auch solare Signale folgen bestimmten Mustern, welche die verschiedenen Emissionsmechanismen der Radiostrahlung aufprägen. Die ausserordentliche menschliche Fähigkeit Muster zu erkennen, wurde bereits angesprochen. Um sie voll einsetzen zu können, muss die auswertende Person zunächst den interessanten Bildausschnitt weiter behandeln.

In Abbildung 5 werden verschiedene Farbtabellen miteinander verglichen. Im schwarz-weissen Bild fallen die Grautöne fast weg. Der Übergang von hell zu dunkel ist sehr schnell und kann nicht adäquat wiedergegeben werden. Die Abbildung 5b von Schwarz über Rot nach Weiss wirkt erstaunlich viel besser. Bei den Farben des Regenbogens hingegen geht die Logik von dunkel nach hell verloren.

Die Abbildung mit der grössten Zahl von Farben (Abb.5 rechts unten) ist von den vier die aussagekräftigste für Astronomen. Abbildung 6 ohne Grün besticht durch ihre Einfachheit und Eleganz. Dies zeigt deutlich, dass die Aussagekraft nicht mit der Farbenzahl weiter ansteigt, sondern ein Optimum hat.

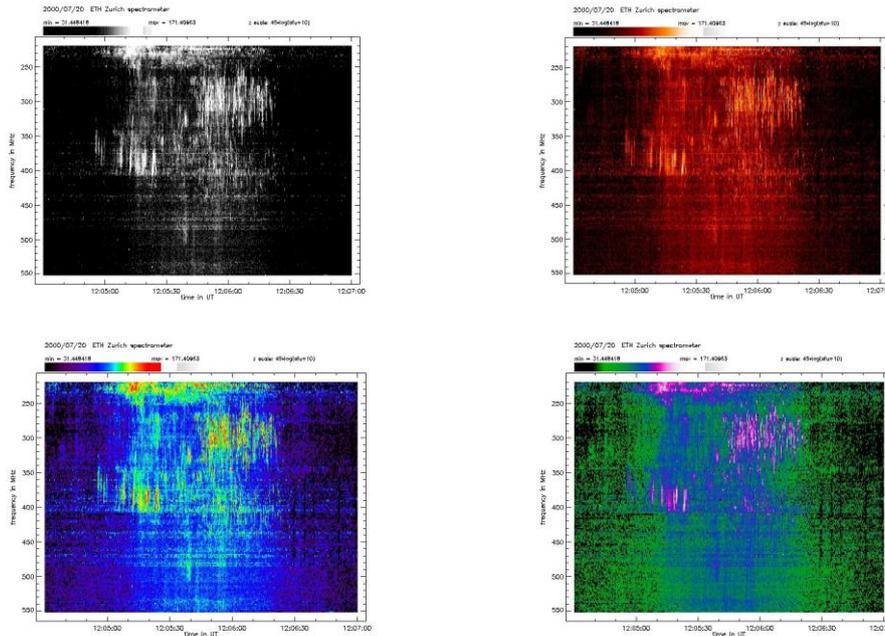


Abbildung 5: Die vier Bilder zeigen die Wirkung verschiedener Farben. *Oben links*: Schwarz-Weiss; *oben rechts*: Schwarz-rot-Weiss; *unten links*: Regenbogen-Farben (wie in Abb.4); *unten rechts*: Schwarz-grün-blau-rot-Weiss. Verschiedene weitere, als Störungen erkannte Strukturen wurden von Hand entfernt.

In den 200-600 MHz Spektrogrammen der solaren Radioastronomie sind 7 Grundformen bekannt mit je einigen Unterkategorien. Sie sind Ausbrüche (*bursts*) von Radiowellen, welche im Zusammenhang mit Sonneneruptionen erscheinen. Die sieben Typen wurden in den Entdeckungs- und Übersichtspublikationen um 1985-1990³ gegeneinander abgegrenzt und anhand von Spektrogrammen in Form von Musterbeispielen definiert.

Der Sinn dieser Klassifizierung ist die begründete Vermutung, dass verschiedene morphologische Typen je spezifische physikalische Ursachen haben. So produziert zum Beispiel ein Elektronenstrahl, der die äusserste Sonnenatmosphäre durchquert und sie zum Schwingen anregt, eine driftende Struktur im Spektrogramm, in flaschenförmige Magnetfelder eingeschlossene Teilchen erzeugen ein diffuses Kontinuum und lokalisierte Plasmawellen in kleinen Beschleunigungsgebieten senden kurze, schmalbandige Spitzen von Radiostrahlung aus. Die Identifikation von Klassen ist fundamental für das Verständnis der Strahlung und der Prozesse, die ihnen zu Grunde liegen.

In Abbildung 6 kann man 4 verschiedene Muster erkennen:

1. Die sehr kurzen und schmalbandigen Spitzen bei 12:06:00 UT und 300 MHz (weiss), vielleicht aus einer Beschleunigungsregion
2. Etwas breitere Strukturen bei 12:05:10 UT und 380 MHz (weiss und rot) von Elektronenstrahlen
3. Ein sehr schmalbandige Muster unter 250 MHz mit Strukturen von langer Dauer (gelb) und unbekannter Ursache
4. Ein Kontinuum über den ganzen Spektralbereich (blau) von eingeschlossenen Elektronen

Wie Muster entstehen

Es folgt aus den vorangehenden Bemerkungen zur Entstehung dieser Muster, dass sie der menschlichen Erfahrung entstammen. Sie sind nicht a priori gegebene Urbilder, die der Wirklichkeit

zu Grunde liegen. Sie sind aber auch nicht beliebig. Sie folgen aus vielen Beobachtungen durch die besten Kenner der Materie und unterliegen einer scharfen *peer review*. Die Fachkollegen würden eine willkürliche Typologie nicht anerkennen, und sie würde nicht Konvention. Muster sind auch immer vorläufige Konstrukte, die z.B. verändert werden können, wenn neue Beobachtungen mit höherer Auflösung möglich werden oder wenn gezeigt werden kann, dass zwei Typen physikalisch identisch sind. Ohne diese Typologie könnten sich Astronomen nicht über die Beobachtungen verständigen, ähnlich wie Biologen wissen müssen, über welches Tier sie sprechen.

Im Unterschied zur Biologie ist die Zuordnung eines bestimmten Ereignisses zu einem dieser Muster in solaren Radiospektrogrammen nicht immer eindeutig. Nicht nur haben verschiedene Beobachter unscharfe und verschiedene Muster im Kopf, es gibt in den Messwerten immer wieder Fälle, die nicht eindeutig zu klassifizieren sind. Das sichere Erkennen von Mustern in Spektrogrammen braucht viel Erfahrung.

In den vergangenen Jahren wurde die Theorie der Mustererkennung im Hinblick auf technische Anwendungen systematisch untersucht⁴. Die Nachbildung des Erkenntnisvorgangs mit digitalen Methoden hat viel zum Verständnis beigetragen. Es ist heute möglich, Computer darauf zu programmieren, in einem Bild ein vorgegebenes Muster zu erkennen. Dafür existieren mehrere digitale Methoden, grundsätzlich sind es immer die folgenden drei Schritte:

1. Das Bild des Musterbeispiels wird auf Kennzahlen reduziert. In der Robotik sind es meistens Werte von Kanten, Ecken, Grössen oder Farbe. Bei einem unscharfen Bild kommen aufwendigere Methoden in Frage, wie die Zerlegung des Bildes in Fourier-Komponenten oder neuronale Netzwerke. Dabei sind dann Hunderte von Kennzahlen nötig. Diese Kennzahlen sind aussagekräftiger als einzelne Bildpunkte und enthalten den essentiellen Bildinhalt. Sie lassen sich viel leichter vergleichen als die Millionen von Pixel in einem Bild.
2. Das zu untersuchende Bild wird auf die selbe Weise auf Kennzahlen reduziert.
3. Schliesslich werden die Kennzahlen verglichen. Sind die Kennzahlen des Bildes genügend nahe beim Musterbeispiel, gilt das Muster als im Bild erkannt.

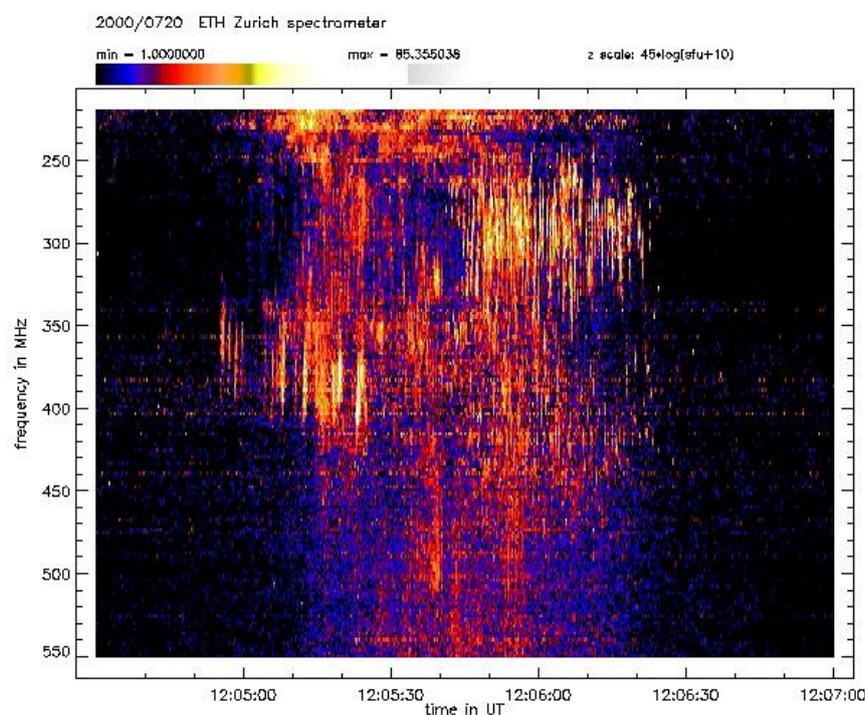


Abbildung 6: Die optimale Bilddarstellung nach der Entfernung von Störungen und der verbesserten Einstellung von Kontrasten. Die Farbtabelle geht von Schwarz über Blau und Rot nach Weiss.

Der Mensch erkennt Muster in den gleichen drei Stufen auf eine nicht-digitale Weise. Bemerkenswert ist z.B. unsere Fähigkeit, Personen zu erkennen. Wenn uns von weitem eine bekannte Person entgegenkommt, ist sie zunächst nur als Mensch erkennbar, und ihre Identität ist unbekannt. Bilder uns bekannter Mitmenschen haben wir im Hirn als Muster gespeichert. Wir können miterleben, wie unser Hirn beim Anblick der näherkommenden Person die Merkmale des Musters erkennt: Nach einer Suchphase nach geeigneten Mustern, deckt sich im Bruchteil einer Sekunde das wahrgenommene Bild mit dem Muster im Kopf. Plötzlich wird dann klar, um wen es sich handelt.

Im Beispiel der Radiospektrogramme gibt es auch eine Suchphase. Es ist eine Zeit, in der die auswertende Person mit dem Bild „herumspielt“. In dieser Phase verändern wir den Kontrast und die Farbtabelle, bis wir ein Muster erkennen oder gegebenenfalls vermuten, ein neues Musterbeispiel entdeckt zu haben. Dies ist in den Abbildungen 5 dargestellt, wo einige Beispiele gegeben sind. Diese spielerische Suchphase nach dem geeigneten Muster kann wesentlich mehr Bilder umfassen. Sie ist durch die digitale Bildverarbeitung in den 1990er Jahren erst konkret möglich geworden.

In Abbildung 6 ist die Bilddarstellung gezeigt, in der die Muster optimal erkannt werden können. Diese Farbtabelle ist sowohl kontrastreich wie auch unmittelbar ansprechend. Die Erfahrung zeigt, dass sie am besten geeignet ist, die gesuchten Muster zu erkennen.

Astronomen würden von Abbildung 6 durchaus von einem „schönen“ Bild sprechen. Dies ist zunächst nur im Sinne von besonders aussagekräftig gemeint. Dies bedeutet, dass die Muster gut erkannt werden können. Für mich hat das Bild auch eine gewisse Ästhetik. Gewiss bin ich stark voreingenommen, und andere müssen entscheiden, ob es sie auch anspricht. Aus meiner subjektiven Perspektive kann ich die These vertreten, dass schöne Bilder für mich Muster hervortreten lassen. Schöne Bilder sind gute Bilder und umgekehrt.

Erkenntnis und Wahrheit

Muster bilden sich in einem gegebenen Erfahrungshorizont und werden dort wieder erkannt. Der Schatz von Mustern, mit denen wir die „Bilder der Welt“ betrachten, bestimmt, was wir erkennen können. Als die ersten Mondfahrten Bilder der Topologie unseres Nachbargestirns mit bisher unerreichter Genauigkeit nach Hause brachten, erkannten die meisten Geologen darin unzählige Vulkankrater. Die Forscher gingen von irdischen Verhältnissen aus und brachten von da das entsprechende Muster ein. Erst nach jahrelangen Diskursen merkten dann auch die letzten, dass das Muster nicht passt. Die Beobachtungen erfüllten viel eher die Merkmale von frischen Einschlagskratern, von denen es auf der Erde infolge der schnellen Erosion nur wenige gibt. Heute geht die Wissenschaft davon aus, dass es keine sicheren Anzeichen gibt für Vulkanismus auf dem Mond.

Fehler in der Mustererkennung können passieren. Weder die Zuordnung eines bestimmten Ereignisses zu einem Muster, noch die Muster selbst sind eindeutig. Und doch verfällt die Forschung nicht einem entmutigten Agnostizismus, sondern macht in aller Vorläufigkeit rasante Fortschritte. Dies geschieht vor allem dadurch, dass andere Beobachtungen (im Beispiel der solaren Eruptionen sind es optische Erscheinungen oder Gammastrahlen) weitere Eigenschaften und Unterscheidungsmerkmale liefern. Offensichtlich sind weder die Muster noch ihre Erkennung absolute Wahrheiten. Und doch haben sie etwas mit der Wirklichkeit zu tun. So wird die Erkennung von Mustern in Radiospektrogrammen der Sonne mithelfen, dass in naher Zukunft brauchbare Voraussagen über das Raumwetter möglich werden.

Literaturangaben:

¹ Wild, J.P. und McCready, L.L., Observations of the spectrum of high-intensity solar radiation at meter wavelengths – I. The apparatus and spectral types of solar burst observed. *Australian Journal of Scientific Research*, Ser. A, Vol. 3, S. 387 (1950).

² Csillaghy A., *Extracting, selecting and visualizing information from digital astronomical images*, *Vistas in Astronomy*, Vol.40, No.4, 503 (1996). Für weitere Theorie siehe auch Forsyth D. und Ponce J., *Computer Vision -- A modern approach*, <http://www.CS.Berkeley.EDU/~daf/book3chaps.html>.

³ Güdel, M. und Benz, A.O., *A catalogue of decimetric solar flare radio observations*, *Astronomy and Astrophysics Suppl.*, Vol. 75, 243 (1988)

⁴ Duda R.O., Hart P., *Pattern Classification and Scene Analysis*, Wiley, N.Y. (1973); Rojas P., *Theorie der Neuronalen Netze: Eine systematische Einführung*, Springer, (1993); Ripley B.D., *Pattern Recognition and Neural Networks*, Cambridge University Press. (1996); Tsvetov D., *The Pattern Recognition Basis of Artificial Intelligence*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos (USA) (1998)