KULTUR NEU ENTDECKEN

SWR2

SWR2 Wissen

Benoît Mandelbrot und die Fraktale

Geniale Mathematiker (6/6)

Von Aeneas Rooch

Sendung: Dienstag, 31. März 2020, 8:30 Uhr
Redaktion: Gabor Paal
Regie: Felicitas Ott
Produktion: SWR 2020

Die unendlich filigranen Fraktale gehören zum Schönsten, was Mathematik zu bieten hat. Ohne Computer hätte Benoît Mandelbrot sie nie entdeckt. Er blieb zeitlebens ein Einzelgänger.

MANUSKRIPT

BEMERKUNG: - Musik soll illustrieren: Fraktale (repetitiv/selbstähnlich, verschachtelt, immer wieder neu entstehend, unendlich filigran) und Computertechnik (elektronisch)

Atmo: „Glas knackt und zerbricht in Scherben“

Sprecherin:
Kann man die Rauheit von zerbrochenem Glas messen?

Atmo: „Wolke quillt auf“

Sprecherin:
Welche Form hat eine Wolke?

Atmo: „Massiver Stein knackt und rumpelt“

Sprecherin:
Welche Gestalt hat ein Berg?

VOICE-OVER MANDELBROT:
„Diese und ein Wust weiterer Fragen sind über eine Vielfalt von Wissenschafts-gebieten verstreut und erst seit Kurzem behandelt worden – durch mich.“

(Benoît Mandelbrot: Schönes Chaos, Pieper, 2013, ISBN 978-3-492-96162-2, S. 10)

Sprecherin:
Das schreibt Benoît Mandelbrot in seiner Autobiographie. Er war ein ungewöhnlicher Mathematiker: Er arbeitete in der Industrie, nicht an der Uni; er benutzte schon früh Computer; er fand Anwendungen in vielen Disziplinen – von Wirtschaft über Strömungslehre bis hin zu Astronomie –; und er wurde berühmt mit filigranen Bildern. Die Figur der von ihm entdeckten „Mandelbrot-Menge“ ist auch durch die Chaostheorie populär geworden und bis heute <u>das</u> Symbol für die geheimnisvollen Schönheiten der Mathematik.

Ansage:
Geniale Mathematiker: **„**Benoît Mandelbrot und die Fraktale“.
Von Aeneas Rooch.

– – – – – – – – – FRAKTALE – – – – – – – – – –

Musik: (gebrochenes, vielschichtiges Muster, Stimmung: „Filigran und komplex wie eine Schneeflocke unter dem Mikroskop eröffnen sich immer neue Details und Welten).

O-Ton 01 („NS Beschreibung Fraktale 1“ - Nina Samuel):
Es gibt unzählige Möglichkeiten, wie ein Fraktal aussehen kann. Es ist eine gebrochene Struktur, die aber so extrem gebrochen ist, dass sie bis in die kleinste Vergrößerung der Struktur gebrochen ist.

Sprecherin:
Die Kunsthistorikerin Dr. Nina Samuel hat in New York eine Ausstellung über das visuelle Denken in den Wissenschaften konzipiert. Im Zentrum standen dabei Bilder von Fraktalen – von Strukturen, die „extrem gebrochen“ sind, das heißt: Egal, wie stark man die Struktur vergrößert, wie nah man heranzoomt – die Linien werden nie glatt.

O-Ton 02 („NS Beschreibung Fraktale 2“ - Nina Samuel):
Zu dieser Eigenschaft hinzu tritt die Eigenschaft der Selbstähnlichkeit oder auch Skalen-Invarianz, das heißt, je größer man diese Struktur vergrößert, je stärker man sie vergrößert, desto öfter trifft man immer wieder ähnliche Muster, die man schon zu Beginn gesehen hat.

Musik aus:

Sprecherin:
Fraktale sind geometrische Formen mit winzigen Details, von denen jedes einzelne wiederum neue winzige Details besitzt, und wieder neue, und wieder neue, immer und immer wieder, sodass die Form unvorstellbar zerfasert. Eine dieser zerfaserten, geometrischen Formen bringt es zu Weltruhm, sie ist benannt nach ihrem Entdecker, Benoît Mandelbrot: die Mandelbrot-Menge.

O-Ton 03 („NS Mandelbrotmenge 1“ - Nina Samuel):
Die Mandelbrotmenge hat so eine typische Knollen-Form, so hat man es immer beschrieben, wie so ein Kartoffelmännchen, also etwas knollig sozusagen, und hat dann an den Seiten…also besonders spannend in der Mandelbrotmenge sind die Ränder: An den Rändern zerfranst sie, oder es gibt so kleine Ornamente die, je näher man sich ihnen annähert, je mehr man sie vergrößert, das kann man halt gerade in den Computer besonders gut machen, desto mehr sieht man, dass mini-kleine Kopien der Ausgangsform sich wieder an den Rändern der Mandelbrotmenge befinden, aber sich immer leicht auch unterscheiden.

Sprecherin:
Diese faszinierende, unendlich formenreiche Struktur entsteht aus einer erstaunlich einfachen Rechenvorschrift.

Sprecher:
*Wähle eine Zahl c und multipliziere sie mit sich selbst. * Nimm das Ergebnis – also c^2 [spr: c Quadrat] – multipliziere es mit sich selbst und addiere die gewählte Zahl c erneut. * Nimm das Ergebnis, multipliziere es wieder mit sich selbst und addiere wieder die gewählte Zahl c. Und so weiter, immer wieder.

Sprecherin:
Je nach dem, mit welcher Zahl c man angefangen hat, verhält sich die so entstehende Zahlenfolge anders: Manchmal werden die Zahlen mit jedem Schritt größer und entfernen sich immer weiter vom Ausgangswert. Manchmal streben sie gegen eine festen Wert; manchmal nähern sie sich mehreren Werten an, zwischen denen sie hin und her pendeln, und manchmal sind sie außer Rand und Band, scheinbar zufällig, wiederholen sich nie, bleiben aber innerhalb eines begrenzten Zahlenbereichs.

Welcher Ausgangswert c sorgt nun für welches Verhalten? Genau das visualisiert die Mandelbrot-Menge… Sie zeigt, bei welchen Startwerten c's die Zahlenfolge explodiert, also über alle Grenzen wächst, und bei welchen nicht. Es werden dabei für c nicht nur Zahlen auf der Zahlengerade betrachtet, sondern auch Zahlen in der zweidimensionalen Ebene - sogenannte komplexe Zahlen. Die Mandelbrotmenge ist deshalb eine flächige Figur.

Sie besteht aus all den Startpunkten, bei denen die Punktfolge auch bei unendlicher Wiederholung der Rechenvorschrift begrenzt bleibt. Diese Startpunkte werden schwarz eingefärbt. So ergibt sich ein fransiger schwarzer Knubbel – die Mandelbrot-Menge.

Musik: (gebrochenes, vielschichtiges Muster, Stimmung: „Filigran und komplex wie eine Schneeflocke unter dem Mikroskop eröffnen sich immer neue Details und Welten)

Sprecherin:
Die Mandelbrot-Menge erinnert entfernt an die Silhouette eines Apfels mit einem Kopf und ganz vielen wiederum filigranen Armen. Deshalb wird sie auch „Apfelmännchen" genannt. Sie ist für die Mathematik heute das, was die Doppelhelix für die Genetik ist: Ein Sinnbild, welche Geheimnisse und welche schönen Strukturen die Natur offenbaren kann, wenn man ihr auf den Grund geht.

Musik aus:

Sprecherin:
Als Benoît Mandelbrot diese zerfaserte, ungewöhnliche Menge entdeckt, ist er 54 Jahre alt und blickt auf einen Lebensweg zurück, der seinerseits ungewöhnlich und zerfasert ist, erzählt er 1999 in einem Interview mit SWR2 Wissen:

O-Ton 04 („BM Discovery of fractals 1" - Benoît Mandelbrot):
It was a very slow process…look for something different something different in flavor.

VOICE-OVER MANDELBROT:
Es war ein sehr langsamer Prozess. Es gab keinen Heureka-Tag, keine Heureka-Minute, nicht mal ein Heureka-Jahr. Aber als junger Mann habe ich mich entschieden – und es fällt mir schwer, die Gründe dafür zu analysieren –, nicht in einem etablierten Wissenschaftsbereich zu bleiben, sondern nach etwas anderem zu schauen, etwas Andersartigem.

– – – – – – – – – – FRÜHES LEBEN – – – – – – – – – –

Sprecherin:
Benoît Mandelbrot wird am 20. November 1924 in Warschau geboren. Die Familie kappt ihre Wurzeln und flieht vor den Nationalsozialisten – erst nach Paris und dann, wenige Jahre später, weiter nach Mittelfrankreich.

Schon als Kind kommt Mandelbrot in Kontakt mit Mathematik – über seinen Onkel, einen polnisch-französischen Mathematiker. Der Onkel begeistert ihn für diese abstrakte, präzise Wissenschaft und ihre schillernden Charaktere Anfang des 20. Jahrhunderts und berät ihn später auch bei der Studienwahl.

Benoît Mandelbrot zeigt Begabung für Mathematik. Nach Kriegsende besteht er die Aufnahmeprüfung an der Elitehochschule „École polytechnique“ mit Bravour – er soll sogar der einzige Kandidat in ganz Frankreich sein, der das Abschlussintegral lösen konnte. Mandelbrot studiert Ingenieurwissenschaften und promoviert schließlich 1952 an der Universität von Paris in Mathematik.

– – – – – – – – – – FINANZMATHEMATIK – – – – – – – – – –

Sprecherin:
Der verschlungene Weg durch die faszinierende Welt der Fraktale beginnt für Mandelbrot in den 1960er Jahren an der Börse.

Atmo Börse:

Sprecherin:
Mandelbrot studiert das Auf und Ab der Aktienkurse.

O-Ton 05 („CES Aktienverlauf Zufall“ - Christina Erlwein-Sayer):
Man kann nicht genau vorhersagen, ob jetzt dieser Aktienpreis am nächsten Tag nach oben oder nach unten geht, weil man natürlich nicht in die Zukunft blicken kann.

Sprecherin:
Doch man kann den Aktienpreis mathematisch modellieren, sagt Christina Erlwein-Sayer, Professorin für Finanzmathematik an der Hochschule für Technik und Wirtschaft in Berlin. Bei diesem „Modellieren“ eines Aktienpreises wird versucht, eine vereinfachende mathematische Formel für den typischen Verlauf zu finden, mit der sich Wahrscheinlichkeiten und Risiken abschätzen lassen.

Atmo: aus (an geeigneter Stelle)

O-Ton 06 („CES Normalverteilung 1 Gaußkurve“ - Christina Erlwein-Sayer):
Oft gehen wir davon aus, dass diese ganzen Zuwächse, also das Hoch und Runter von solchen Preisen, normalverteilt ist. Also man denkt, solche Zuwächse schwanken so ein bisschen rauf und runter um die Null, und an den Seiten, also sehr starke positive Zuwächse und sehr starke negative Zuwächse, die sind eigentlich extrem selten bei so einer Normalverteilung.

Sprecherin:
Doch die Realität sieht immer wieder anders aus.

O-Ton 07 Collage „Börsencrash“

O-Ton 08 („CES Normalverteilung 3 Extreme “ - Christina Erlwein-Sayer):
Man beobachtet tatsächlich viel häufiger extreme Ereignisse. Also man beobachtet natürlich nicht häufig, aber doch immer mal wieder auch Börsencrashs, sehr viel turbulentere Märkte, die mit einer höheren Wahrscheinlichkeit wirklich auch mal abstürzen können oder auch einfach größere Sprünge machen können als sowas bei einer Normalverteilung abgebildet werden könnte.

Sprecherin:
Das fällt in den 1960er Jahren auch Mandelbrot auf.

O-Ton 09: („BM Discovery of fractals 3“ - Benoît Mandelbrot):
I felt that the disorder of finance……look more amorphous without any form whatsoever.

VOICE-OVER MANDELBROT:
Ich spürte, dass das Chaos an den Finanzmärkten, die Unvorhersagbarkeit der Preise und ihr überaus seltsames Verhalten so extrem waren, dass die üblichen Methoden einfach nicht passten. Und ohne zu merken, dass ich dabei war, etwas Neues und Großes zu beginnen, habe ich etwas intensiv untersucht, was man vielleicht „Rauheit der Natur“ nennen kann: nicht die geraden Linien oder Kreise oder andere seltenen Phänomene, die einfach und geometrisch sind, sondern Gebilde, die eher chaotisch aussehen und keine klare Form oder so besitzen.

Sprecherin:
Gebilde wie Aktienkurse. 1963 beschreibt Mandelbrot Aktienkurse mathematisch – aber nicht mit der üblichen Normalverteilung, sondern:

O-Ton 10 („CES Normalverteilung 5 Andere Verteilungen“ - Christina Erlwein-Sayer):
Mit einer Verteilung, die mehr Wahrscheinlichkeit den extremen Ereignissen zuweist, also, die mit einer höheren Wahrscheinlichkeit abbilden kann, dass es eben zu Extremen, Verlusten oder auch zu extremen Zuwächsen kommen kann.

Sprecherin:
Rund 40 Jahre später, 2005, veranstaltet die Deutsche Bundesbank ein Festkolloquium, um Benoît Mandelbrot zu ehren – für seine wissenschaftlichen Beiträge, Finanzmärkte besser zu verstehen.

– – – – – – – – – SELBSTÄHNLICHKEIT – – – – – – – – –

Sprecherin:
Nicht nur die extremen Ereignisse faszinieren Mandelbrot an Aktienkursen, sondern noch etwas anderes: Ein typischer Kursverlauf mit seinem gezackten Auf und Ab sieht in gewisser Weise immer gleich aus.

O-Ton 11 („CES Selbstähnlichkeit“ - Christina Erlwein-Sayer):
Also wenn wir in solche Renditen reinzoomen, in so einen Graph reinzoomen, dann sehen wir die gleiche Dynamik und können eigentlich, wenn wir jetzt drei Grafiken nebeneinander legen würden und das eine würde uns den Zeitverlauf von zwölf Stunden zeigen und das andere von zwölf Tagen und das nächste von zwölf Monaten, kann man durch bloßes Draufschauen die Skala nicht erkennen. Also es ist diese Selbstähnlichkeit, dass wir eben den gleichen, zufälligen Verlauf beobachten können.

Sprecherin:
Diese Selbstähnlichkeit erkennt Mandelbrot nicht nur bei Aktienkursen, sondern auch bei realen Gegenständen in der Natur, zum Beispiel bei Brokkoli und Blumenkohl, schildert Steffen Winter, Mathematiker am Karlsruher Institut für Technologie:

O-Ton 12 („SW Selbstähnlichkeit Blumenkohl“ - Steffen Winter):
Wenn man von einem Blumenkohl ein Teil abbricht und dann vergrößert, also die Lupe draufhält, dann sieht es genauso aus wie der ganze Kohl. Und dann kann man wieder einen Teil aufbrechen und eine größere Lupe draufhalten. Und man sieht wieder ein Objekt, was dem ganzen Blumenkohl ähnelt.

Sprecherin:
In der Mathematik sind selbstähnliche, zerklüftete Gebilde auch schon vor Mandelbrot bekannt, allerdings hauptsächlich als kuriose Einzelstücke. 1904 etwa beschreibt der schwedische Mathematiker Helge von Koch eine selbstähnliche, raue, unvorstellbar zerklüftete Kurve. Sie ist eines der ersten Fraktale – auch wenn sie zu ihrer Zeit noch nicht so genannt wird, sondern „Monsterkurve“.

Diese Koch’sche Kurve entsteht, wenn man eine gerade Linie in der Mitte mit einer Zacke versieht, einer Ausbuchtung, und dieses Ausbuchten auf allen geraden Abschnitten immer wieder wiederholt; beschreibt Steffen Winter:

O-Ton 13 („SW Schneeflocke“ - Steffen Winter):
Stellen Sie sich vor, Sie wollen von A nach B laufen. Das können Sie entlang einer Strecke tun, hat vielleicht die Länge eins. Und jetzt fangen Sie aber an, Umwege zu laufen. Über dem mittleren Drittel der Strecke errichten sie ein gleichseitiges Dreieck, und dann laufen sie statt auf der Strecke lang gehen Sie den Umweg über die beiden neuen Dreiecksseiten, dann ist ihr Weg länger. Also, wenn er vorher eins war, dann ist da jetzt 4/3, Sie haben viermal so eine Strecke der Länge ein Drittel zu durchlaufen. Und jetzt setzen Sie diese Konstruktion von Umwegen fort,
indem sie über jeder dieser Teilstrecken wieder so Dreiecke über dem mittleren Drittel konstruieren und dann wieder entlang der neuen Dreiecksseiten laufen.

In diesem Schritt wird die Kurve wieder länger, und wenn Sie diese Konstruktion fortsetzen, dann wächst der Weg, den Sie gehen, um von A nach B zu kommen, eben über jede Länge. Sie können also diese Kurve unendlich lang machen.

– – – – – – – – – – KÜSTENLINIE – – – – – – – – – –

Sprecherin:
Benoît Mandelbrot ist nicht der erste, der sich mit Selbstähnlichkeit befasst, doch er erkennt selbstähnliche Strukturen in den verschiedensten Disziplinen: Als er beispielsweise einen Aufsatz über die Messung von Küstenlängen liest, bemerkt er Ähnlichkeiten zu der Koch'schen Kurve und zum Auf und Ab der Börse – denn auch eine Küstenlinie ist rau und uneben und offenbart immer mehr Struktur, je genauer man hinschaut. Das hat dramatische Konsequenzen:

O-Ton 14 („SW Küstenlänge" - Steffen Winter):
Ach, die Küste ist ja viel länger, weil, wenn ich da genauer hinschaue, dann sind halt noch zusätzliche Buchten und Halbinseln aufgetaucht, die ich jetzt noch mit in die Messung einbeziehen muss. Und wenn ich dann noch genauer hinschaue, dann finde ich wieder kleine Strukturen, die ich dann mit messen muss, wenn ich mit einem feineren Maßstab messe. Und dann wird die Küste noch länger.

Sprecherin:
Auf dieses Problem weist Mandelbrot 1967 in der Zeitschrift „Science" hin, in einem Aufsatz mit dem Titel „Wie lang ist die Küste Großbritanniens?". Ein Meilenstein, findet Kunsthistorikerin Nina Samuel.

O-Ton 15 („NS Küstenlänge Britanniens" - Nina Samuel):
Das ist sozusagen die Gründungsschrift der fraktalen Geometrie, wo eben die Küstenlänge als unendlich berechnet wurde, da sie eben so unendlich zerfurcht ist und eben eine fraktale Dimension hat.

– – – – – – – – – – FRAKTALE DIMENSION – – – – – – – – – –

Sprecherin:
Fraktale Dimension heißt „gebrochene" Dimension. Wie sich herausstellt, sind viele zerklüftete Kurven – Küstenlinien, Börsenkurse, Monsterkurven und so weiter – unendlich zerfasert, sodass sie mit dem üblichen Dimensionsbegriff nicht zu fassen sind: Sie besitzen nicht die Dimension 0 wie ein Punkt, nicht die Dimension 1 wie eine Linie oder die Dimension 2 wie eine Fläche, sondern etwas dazwischen. Im Jahr 1919 findet der Mathematiker Felix Hausdorff eine Möglichkeit, den intuitiven Dimensionsbegriff so zu erweitern, dass er auch vielen dieser zerklüfteten, irregulären Objekte eine sinnvolle Dimension zuordnet – eine Bruchzahl –, eine gebrochene Dimension wie etwa 1,2619.

– – – – – – – – – – VISUELLES VS MATHEMATIK– – – – – – – – – –
Musik: (Geometrische Struktur, bildliche Vorstellungskraft; Stimmung: „Ich denke mir Formeln als Bild und erkenne in Bildern mathematische Strukturen.")

Sprecherin:
Während die Selbstähnlichkeit bei natürlichen zerklüfteten Strukturen irgendwann doch endet – im Kleinen spätestens auf der Ebene der Moleküle und Atome – geht sie bei mathematischen Fraktalen unendlich weiter. Im Apfelmännchen der Mandelbrotmenge erkennt man selbst bei Milliardenfachen Heranzoomen immer neue Apfelmännchen. Die Mandelbrotmenge wurde schnell auch außerhalb der Mathematik populär, auch durch die Chaostheorie, die in den 1980er-Jahren populär wurde. Das Apfelmännchen versinnbildlicht, welches Chaos selbst mit einfachsten Regeln erzeugt werden kann und wie unendlich komplex geordnete Strukturen sein können. Kunsthistorikerin Nina Samuel erforscht, wie Bilder und wissenschaftliche Erkenntnis zusammenhängen. Für ihre Arbeit spricht sie Mitte der 2000er Jahre viele Stunden mit Benoît Mandelbrot. Er verrät ihr, dass es immer Bilder gewesen sind, die ihn zu mathematischen Ideen inspiriert haben.

O-Ton 16 („NS Visuelles Denken" - Nina Samuel):
Dass sozusagen sein unglaublich sensibles Auge und seine starke geometrische Auffassungsfähigkeit ihn zu diesen Bildern geleitet haben und die auch in seiner Erinnerung eingebrannt haben, dass er damit dann eben arbeiten konnte. Also er hat auch erzählt, dass er zum Beispiel mit 19 schon feststellte, dass er immer, wenn er eine Formel hört, eine geometrische Form vor Augen hat. Und das ist was, was für ihn schon sehr charakteristisch ist: Dass er, wie gesagt, mit so einer starken geometrische Intuition oder so einem starken visuellen Denken gearbeitet hat.

Musik aus:

Sprecherin:
Mandelbrot verfolgt eine andere Herangehensweise als die moderne, französische Mathematik, die bildliche Anschauungen über Bord wirft und Abstrahiertes in den Mittelpunkt stellt. Und er ist auch in einem anderen Sinne ein ungewöhnlicher Mathematiker: Das, was Wissenschaftler in der reinen Mathematik normalerweise tun, macht er kaum: streng-logische Beweise führen.

O-Ton 17 („SW Mandelbrot Zusammenhänge" - Steffen Winter):
Also die tiefen, schwierigen Sätze, die haben dann andere bewiesen.

Sprecherin:
…sagt Steffen Winter…

O-Ton 17 („SW Mandelbrot Zusammenhänge" - Steffen Winter):
Aber er hat die Dinge gesehen, eine tiefe Einsicht gewonnen, viele Ideen gehabt und viele Ideen zusammengetragen, die andere hatten, und hat die Zusammenhänge dargestellt. Er hat die Verbindung gesehen. Ich glaube, das ist sein größtes Verdienst.

Sprecherin:
Mandelbrot interessiert sich für anschauliche Dinge, und immer wieder für neue Dinge. Vielleicht macht es dieses breite Interesse für ihn schwierig, in der reinen Mathematik Fuß zu fassen? Nach der Promotion arbeitet er bei Philips Electronics, am MIT in Cambridge, am „Institute for Advanced Study“ in Princeton, er heiratet, zieht nach Genf und wieder zurück nach Frankreich, er wechselt an die „Université Lille Nord de France“ – und schließlich mit Mitte 30 in die Industrie, zur Forschungsabteilung des US-amerikanischen IT-Unternehmens IBM. Hier bleibt er über 30 jähre lang und kann seinen Interessen nachgehen: rauen, selbstähnlichen Mustern und Strukturen – den Fraktalen. Mandelbrot wird mit ihnen berühmt, und sie mit ihm.

Mathematiker und Computer-Freaks haben seither zahllose weitere Fraktale entdeckt. Es gibt etliche Bildbände, in denen diese Figuren als farbenfrohe, hypnothische Landschaften dargestellt sind oder wirken, als wären es lebende Organismen. Manche erinnern an Seepferdchen, andere an Schlingpflanzen.

– – – – – – – – – – MANDELBROTMENGE – – – – – – – – – –

Sprecherin:
Wäre Mandelbrot nicht in der Computerindustrie gelandet, womöglich hätte er die Mandelbrot-Menge, das Vorzeige-Fraktal, nie entdeckt. Bei IBM untersucht er Punktmengen, die sich von bestimmten mathematischen Umformungen nicht verändern lassen – sondern bleiben, wie sie sind. Solche invarianten Mengen hatten die französischen Mathematiker Pierre Fatou und Gaston Julia schon 50 Jahre früher untersucht, um 1918; Mandelbrot jedoch macht etwas, was Fatou und Julia nicht konnten, und was auch in den 1970er Jahren etwas Außergewöhnliches ist: Er lässt die widerstandsfähigen Mengen von Computern zeichnen, um sich ein Bild von ihnen zu machen.

Musik: (Filigrane Muster, komplexe Berechnungen, Computertechnik; Stimmung: „Am Computerbildschirm entstehen verwirrende Muster und Strukturen.“)

Sprecherin:
Ihm stehen leistungsstarke Rechenmaschinen zu Verfügung, die besten, die man sich vorstellen kann, schildert Nina Samuel:

O-Ton 18 („NS IBM Computer “ - Nina Samuel):
Er hat diese Maschinen einfach mal diese Form durchspielen lassen und Bilder generiert und einfach mal sozusagen wie in einem neuen Gebiet, sich mal umgeschaut und einfach nur geguckt, was kommen da für Bilder bei raus?

Sprecherin:
Mit den Ergebnissen kann er jedoch erst einmal nichts anfangen.

O-Ton 19: („NS IBM Komplexe Ergebnisse “ - Nina Samuel):
Er konnte daraus letzten Endes keinen richtigen mathematischen Sinn generieren. Ich habe in seinem Büro damals stapelweise Bilder aus dieser Zeit noch gefunden. Also das muss in die Hunderte, 500 und mehr Grafiken mindestens, gehen, die dort gerechnet wurden, und letzten Endes, ja, führten sie jetzt erst mal zu keinem großen Ergebnis. Also viel wurde auch einfach ausprobiert in dieser Zeit. Was konnte man mit der Mathematik und mit dieser Art von neuen Computern grafischen Möglichkeiten machen?

Musik: aus mit Akzent

Sprecherin:
Dass Mandelbrot trotzdem der Welt der Fraktale auf die Spur kommt, verdankt er einem Zufall: 1979 erhält er eine Gastprofessur in Harvard, wo er weiter an Mengen forschen will, die unter bestimmten Umformungen invariant sind – das heißt bleiben, wie sie sind. Spitzenuniversität hin oder her – hier muss er sich mit viel schlechteren, älteren Computern zufrieden geben als beim IT-Unternehmen IBM, also lässt er seinen Programmierer nicht die komplizierten kubischen Mengen zeichnen wie bisher, sondern einfachere – quadratische. Er erwartet, nun auch einfachere Bilder zu erhalten.

O-Ton 20 („NS Harvard Einfache Bilder“ - Nina Samuel):
Was aber tatsächlich passiert ist: Dass er Bilder voller, wie er es nannte, voller Verschmutzung sah, also Bilder, die überall sowie Schmutzschlieren hatten oder seltsame Flecken. Und dann kam, war er sehr unsicher: Gehörten diese Flecken zu den schlechten Druckern der Zeit oder einfach zu der schlechten Technik oder, und das ist die spannende Frage, oder ist es Mathematik?

Sprecherin:
Dass Mandelbrot auch bei den einfacheren Berechnungen Bilder mit seltsamen Störungen erhält, macht ihn neugierig, und zurück bei IBM wiederholt er die einfachen Berechnungen auf den leistungsstarken Computern, untersucht Details und findet heraus: Der Schmutz auf den Bildern ist kein Schmutz, es sind filigrane Strukturen. Mandelbrot hat die Mandelbrot-Menge entdeckt – ein Fraktal und heute das vielleicht bekannteste Objekt der modernen Mathematik.

O-Ton 21 („BM Computer shows mental pictures“ - Benoît Mandelbrot):
So for a while, I had been trusting mental pictures… … proof of the ability to understand became increasingly obvious. So for a while, I had been trusting mental pictures and doing my best to describe them in prose. Very ineffectively, but with the computer, I was able to show very precisely what my mental pictures were. Also to refine them to improve them to make them better to test them, which before was completely impossible. After this event, the possibility of using the ability to emit data as a proof of the ability to understand became increasingly obvious.

VOICE-OVER MANDELBROT:
Ich habe lange Zeit einfach den Bildern vertraut, die ich vor meinem geistigen Auge hatte, und ich habe mein Bestes gegeben, sie mit Worten zu beschreiben – das war ineffizient! Aber mit dem Computer konnte ich diese Bilder präzise wiedergeben.

Ich konnte sie verfeinern, verbessern und untersuchen. Das Ausgeben und Ausdrucken von Daten, war eine neue Möglichkeit zu beweisen, dass man etwas verstanden hat. Das wurde auf diese Weise zunehmend klar.

Sprecherin:
Nicht immer liegt Mandelbrot mit seiner bildlichen Intuition und seinen Computerausdrucken richtig. Einmal nimmt er per Hand Korrekturen an einer Computergrafik vor – die sich später, nach eingehender mathematischer Analyse, als falsch herausstellen, erzählt Nina Samuel.

O-Ton 22 („NS Bildern zu sehr geglaubt“ - Nina Samuel):
Das zeigt das Dilemma auch bei der Arbeit mit seinen Bildern. Er hat sie geliebt. Er hat unglaublich kreativ mit ihnen gearbeitet, aber es manchmal eben auch in die Falle der Bilder getappt und hat an dem Bild doch zu sehr geglaubt und falsche Resultate verkündet.

– – – – – – – – REZEPTION UND AKADEMISCHE WELT – – – – – – – – – –

Sprecherin:
Die rauen, komplexen Strukturen, die Mandelbrot am Computer aus einer einfachen Gleichung produziert hat, erkennt er auch in vielen realen Objekten – in Glasscherben, Wolken, Steinen, Inseln, Bäumen, Blutgefäßen und in der Verteilung von Galaxien… 1982 trägt er seine Ideen über all diese zersplitterten Strukturen in einem Buch zusammen: „The Fractal Geometry of Nature“, auf Deutsch: „Die fraktale Geometrie der Natur“. Es macht Fraktale einer breiten Öffentlichkeit bekannt.

Musik: (Einsam, unzufrieden, innerer Konflikt; Stimmung: „Ich fühle mich als Einzelgänger, meine Leistungen werden nicht so geschätzt, wie ich das gerne hätte.“)

Sprecherin:
35 Jahre lang arbeitet Mandelbrot bei IBM. Erst danach, im Jahr 1999, erhält er seine erste unbefristete Professorenstelle – im Alter von 75 Jahren.

O-Ton 23 („NS Mathematische Community“ - Nina Samuel):
Und natürlich ist da eine gewisse Ambivalenz, da er auch Zeit seines Lebens immer wieder an der Uni Gastauftritte hatte und, ich denke, auch gerne von der mathematischen Community noch ernster genommen worden wäre.

Sprecherin:
Sein Verhältnis zur akademischen Welt ist zwiespältig, sagt Nina Samuel:

O-Ton 24 („NS nicht verbittert“ - Nina Samuel):
Nein, er war nicht verbittert. Also ich habe ihn wirklich als nicht verbittert kennengelernt. Es war ihm sehr wichtig, wie er in der Nachwelt wahrgenommen wird. Sein Platz in der Geschichte sollte gewahrt werden. Da durfte man auch nicht viel kritisieren. Aber er war nicht verbittert, das habe ich jetzt nicht rausgehört.

Sprecherin:
Mandelbrot nennt sich in seiner Autobiographie selbst einen „Einzelgänger". Die Autobiographie erscheint postum – nach seinem Tod im Jahr 2010.

Mathematiker wie Steffen Winter erforschen noch heute rigoros die Eigenschaften fraktaler Strukturen – aus einer rein mathematischen, abstrakten und formalen Perspektive. Und auch in vielen anderen, angewandten Wissenschaften und Technologien spielen Fraktale eine Rolle.

Atmo: „Massiver Stein knackt und rumpelt"

O-Ton 25 („SW Anwendung Geologie" - Steffen Winter):
Zum Beispiel in der Geologie, also zu Beschreibung von Gestein, da werden tatsächlich Fraktale Methoden bis heute herangezogen, haben sich da zum Standard etabliert.

Atmo: „Bäume entstehen am Computer"

O-Ton 26 („SW Anwendung Computersimulation" - Steffen Winter):
Auch in der Bildverarbeitung oder auch Computersimulation haben fraktale Methoden Einzug gehalten, etwa um eben in Animationsfilmen oder Computerspielen Landschaften zu generieren oder auch Wälder, Bäume zu generieren. Da sind solche fraktalen Ideen sehr effektiv.

Atmo: „Funksignale"

O-Ton 27 („SW Anwendung Handyantenne" - Steffen Winter):
Wenn man das Antennen-Design von vor 50 Jahren nehmen würde, dann müssten unsere Handyantennen alle zwei Meter lang sein. Aber man hat eben selbstähnliche Strukturen gefunden, die viel kleiner sein können und die ähnlich leistungsfähig sind wie die großen Antennen, die man früher benutzt hat.

Sprecherin:
Fraktale haben etliche Anwendungen und lassen sich in vielen Bereichen in der Natur finden. Benoît Mandelbrot, der „Vater der fraktalen Geometrie" und der Verehrer der bildlichen Anschauung, sah sein größtes Verdienst jedoch in etwas anderem:

O-Ton 28 („BM Return of the eye" - Benoît Mandelbrot):
I think the most important application is not one specific element, one theory, one technology or something, but something more fundamental which is the return of the eye into science.

VOICE-OVER MANDELBROT:
Ich glaube, die wichtigste Anwendung der Fraktale ist keine spezielle, nicht die <u>eine</u> Theorie oder die <u>eine</u> Technologie oder so etwas, sondern etwas Fundamentaleres, nämlich: die Rückkehr des Auges in die Wissenschaft.

Evtl. Akzent

Sprecherin:
Nachtrag: Das gesamte bisher unveröffentlichte Interview mit Benoît Mandelbrot von 1999 gibt es auf unserer Internetseite.

* * * * *