



Wolken modellieren

Wolkenformationen und ihre Verwandlungen auf bilddigitalem Weg zu simulieren und in klimatologische Studien zu integrieren, ist eine der komplexesten Aufgaben der aktuellen Umweltphysik. Die Schwierigkeit erklärt sich zum einen sicherlich aus der Konturlosigkeit der nebulösen Gebilde – ihre formale Instabilität und dynamische Prozessualität widerspricht und widersetzt sich der Prognosetätigkeit der Meteorologen bzw. Klimatologen. Immer wieder stellt sich dabei die Frage nach der Codier- und Fixierbarkeit der diffusen Formverläufe, nach der Umrissbildung und Bestimmung eines prinzipiell ungeklärten Figur-Grund-Verhältnisses.

Im Folgenden soll die Problemstellung komplexer Simulationstechniken auf klimatologische Bildgebungsverfahren angewandt werden. Ist, wie Hubert Damisch postulierte,¹ die Wolke tatsächlich ein widersetzliches Element im visuellen Repräsentationsvorgang? Was geschieht mit dem nebulösen Ding, sobald es im verdunkelten Kastenraum der computergestützten Simulation zur Darstellung gebracht wird? Die Frage nach dem Figurationspotenzial digitaler Bildgebungsverfahren, das sich an den Instabilitäten flüchtiger Wolkenformationen messen muss, hat einen eigenen Beruf hervorgebracht: den des Wolkenmodellierers.



Abb. 1: Sammelgeräte für Aerosole

(1) Hubert Damisch, *Théorie du /nuage/. De Giotto à Cézanne. Pour une histoire de la peinture*, Paris 1972. Vgl. dt. Auszug in diesem Band.

Rain drops

Am Institut für Troposphärenforschung in Leipzig werden die komplexen Bildungsvorgänge für Wolken mit *LACIS* (*Leipzig Aerosol Cloud Interaction Simulator*) studiert. Sammelgeräte werden auf dem Boden aufgestellt oder wie Reusen mit Flugzeugen über den Himmel gezogen, um die Schwebeteilchen der Luft (*Aerosole*) – Staub, Ruß- oder Schwefelpartikel – abzusaugen und zu filtern. Nach Definition ihrer Größe und chemischen Zusammensetzung werden sie synthetisch neu erzeugt, in den Wolkenreaktor von *LACIS* eingespeist und zur Tropfenbildung gebracht. Während ihres Falls durch das lange Strömungsrohr des Wolkenlabors nämlich ziehen sie umliegende Wasserstoffmoleküle an, die durch das thermodynamische Gefälle im Inneren des Schachts kondensieren – das anfangs trockene Partikel beginnt auf diese Weise zu wachsen. Übersteigt die Wasserdampfkonzentration einen kritischen Wert, vergrößert sich das Partikel schlagartig und ein Wolkentropfen entsteht.

Im Moment arbeiten die Wissenschaftler am *IfT* noch mit einer 1 m langen Mini-Version des Wolkenrohrs. Ein Gewirr an Schläuchen und Zuleitungen sichert die Versorgung des Strömungsrohres mit wohl definierten Partikeln und der genau eingestellten Schleierluft der thermodynamischen Umgebung. Am unteren Ende des Rohres wird die Größe der entstandenen Tropfen ausgemessen, wobei ein Laserstrahl durch eine kleine Öffnung des Strömungsrohres quer zur Strömungsrichtung der Tropfen geschickt, seine Streuung algorithmisiert und in die entsprechende Tropfengröße umgerechnet wird. Momentan wird ein Neubau mit einem weithin sichtbaren Wolkenturm errichtet, in dem das 10 m lange große Wolkenrohr aufgebaut wird. Ende des Jahres rechnen die Leipziger Wissenschaftler mit ersten Messergebnissen.²



Abb. 2: Wolkenreaktor LACIS des Leipziger Instituts für Troposphärenforschung

(2) Manfred Wendisch in einem Interview vom 18. April 2005. Ich danke an dieser Stelle Manfred Wendisch und Oswald Knoth vom Leipziger Institut für Troposphärenforschung für ihre Beratung und Unterstützung.

Schwebend

Festzuhalten ist, dass jeder Wassertropfen ein winziges Schwebeteilchen birgt. Die Tropfenform benötigt, ähnlich einer Perle, einen Kondensationskeim, an dem der atmosphärische Wasserdampf andocken und weitere Atome an sich ziehen kann. Dass Wolken in irgendeiner Weise aus kondensiertem Wasserdampf bestehen, hatten schon die antiken Naturphilosophen vermutet. Umso rätselhafter kam es ihnen vor, dass sie trotz ihrer offensichtlichen Schwere in der Luft schweben konnten. Aristoteles nahm deshalb an, dass Sprühtröpfchen aufgrund ihrer winzigen Größe nach oben steigen konnten und über den größeren Luftmassen zu ruhen kamen: »Wie feiner Erd- oder Goldstaub, der auf dem Wasser treibt«. Im 17. Jahrhundert wiederum glaubte man, Wasserdampf bestehe aus mit Feuer gefüllten Wasserbläschen, die wie winzige Heißluftballone in die Luft stiegen.³ Auf welche Weise der gewölkte Wasserdampf tatsächlich an den Himmel geriet, blieb lange ungeklärt, im Grunde konnte keine Antwort gegeben werden, ohne die Wolkengestalt als Ganzes in Frage zu stellen. Nahm man nämlich an, die am Himmel driftende Wolke wäre stets dieselbe sich vorwärts bewegende Masse – ein »Weiterlaufen desselben Körpers«⁴ im aristotelischen Sinn, der irgendwann birst und Myriaden von Regentropfen herausschleudert –, so war es absolut unverständlich, wie sich die Tropfen so lange in der Luft halten konnten und nicht eher zu Boden fielen. Dagegen erschien die thermodynamische Umschichtlehre revolutionär nicht zuletzt aufgrund der konsequenten Auflösung jeglichen Formenrealismus. Tatsächlich sinkt jeder Tropfen aufgrund seines Gewichts stetig nach unten, während kondensierender Wasserstoff nachgeliefert wird und die Wolke neu formuliert. Denkt man diesen Gedanken zu Ende, so löst sich die Wolkengestalt an ihren unteren Rändern in jedem Augenblick auf, erscheint ausgefranst, eine riesige Umwälzmaschine, deren nebulöse Aktionen zum Symbol für Austausch und Morphose schlechthin geraten.

Wolkendampfmaschinen

Das Problem der Grenze ist damit bereits thematisiert. Für Troposphärenforscher gibt es keinen Unterschied zwischen Wolke und umgebenden Luftraum. Für sie lässt sich eine Wolke zwar visuell unterscheiden, im Grunde handelt es sich jedoch um eine Aggregatbildung von Wasserstoffmolekülen, die sich genauso in der unbewölkten Umgebung finden lassen. Der Unterschied wird rein quantitativ gewertet: eine Feuchtigkeitszunahme, verstanden als serielle Adaptionstechnik einzelner Schwebepartikel, die in der Luft lagern und auf die umliegenden Moleküle unwiderstehliche Anziehungskräfte aus-

(3) Dieser Gedanke findet sich z. B. bei Urbano d'Aviso, *Lettera al dottor G. B. Capponi*, Bologna 1666, S. 79, und Pardies, *Mémoire de Trevoux*, März/April 1701, S. 155–166, siehe Middleton, *A History of the Theories of Rain and Other Forms of Precipitation*, London 1965, S. 23 und S. 46.

(4) So bei Aristoteles, *Meteorologie*, hg. v. Paul Gohlke, Paderborn 1955, Buch I, S. 29. An dieser Stelle wird die Wolke dann auch mit einem Wurfgeschoss verglichen, das durch den Luftraum fliegt: »Wurf: ist ja immer ein Weiterlaufen desselben Körpers«. (Ebd.) Für Aristoteles ist die Wolke eine verdichtete Ausdünstung, die aufgrund innerer Temperaturunterschiede und Kondensationsgrade wärmere Luft absondert und nach oben ausscheidet. Die Grundprinzipien (»Verdichtung« und »Absonderung«) sind bei ihm auch ausschlaggebend für Regenbildung und Wolkenbruch: Die Wolke birst aufgrund innerer Turbulenzen.

üben. Einmal erkannt, dass die qualitative Unterscheidung von Wolke und Nichtwolke vor allem in der spezifischen Beschaffenheit der in der Luft schwebenden, ein ganzes Spektrum anziehender und abstoßender Prozesse in Gang setzender Keime zu suchen ist und nicht in den dunstigen Wolkenfeldern selbst, wird der Nachdruck verständlich, mit der die Meteorologie eine atomistische Argumentation befürwortete und eine Morphologie der Wolke im Lauf der Zeit zurückstellte. So betrachtet zerstiebt das fransige Gewölk in Partikel und Atome, deren Reaktionen auf die Temperaturschwankungen des Milieus eine Thermodynamik in Gang setzen, die eben zur Formgenese führt.

Michel Serres hat diese Entdeckung in der Frühzeit der industriellen Revolution verortet, wenngleich man sie bereits im 17. Jahrhundert nachweisen kann, in dem der Atomismus rasant an Boden gewann. Es begegnet uns dabei der seltsame Umstand, dass zur selben Zeit, in der die morphologischen Wolkenklassifikationen ins Zentrum des meteorologischen Interesses rückten und Naturwissenschaftler, Maler und Zeichner sich an den wechselhaften malarischen Masseverteilungen am Himmel versuchten, die Wolke auch als Dampfmaschine oder Umwälzmotor im frühindustriellen Sinn verstanden wurde. Dabei geht es um reine Energie und Mobilität, um in Atome und später in Elektronen zerstiebende Materie, die sich auf metaphorischer Ebene sehr gut mit den Farbpigmenten auf der Palette und Leinwand der Künstler vergleichen ließ. Serres hat deshalb William Turner einen Wegbegleiter der naturwissenschaftlichen Entwicklung von der Mechanik zur Thermodynamik genannt. »Turner hat die neue Welt, die neue Materie verstanden und er macht sie sichtbar. *Die Wahrnehmung des Stochastischen ersetzt die Zeichnung der Form*. Die Materie bleibt nicht länger den Gefängnissen des Schemas überlassen. Das Feuer löst sie auf, lässt sie vibrieren, zittern, oszillieren, lässt sie in *Wolken* explodieren. (...) Von der gefaserten Gitterstruktur zur Zufallswolke. Niemand vermag den Rand einer Wolke zu zeichnen, diesen Grenzbereich des Zufalls. In dem die Teilchen zittern und verschmelzen, zumindest in unseren Augen. (...) An diesen gänzlich neuen Bildern, die von Zeichnung und Geometrie verlassen sind, wird eine neue Welt schon bald die Auflösung und Zerstreuung der Atome und Moleküle entdecken. Das Feuer des Dampfkessels atomisiert die Materie und setzt sie dem Zufall aus (...)«.⁵ »Alles kehrt sich um, Materie und Malerei triumphieren über Zeichnung, Geometrie und Form. (...) Turner oder die Einführung der entzündeten Materie in die Kultur. Das erste wahrhaftige Genie der Thermodynamik«.⁶

Auch Gernot und Hartmut Böhme haben auf die Vergleichgültigung der elementaren Qualitäten von Feuer, Wasser, Erde und Luft durch die entzündete Materie des industriellen Zeitalters hingewiesen.⁷ Die Erfindung

(5) Michel Serres, *Über Malerei. Vermeer – La Tour – Turner*, hg. von Gerti Fietzek und Michael Glasmeier, mit einem Nachwort von Peter Bexte, Berlin 1992, S. 97f. Siehe auch: Ebd., S. 92f.: »Was ist die industrielle Revolution? Eine Revolution in der Materie. (...) Der Weg, der (...) zu Turner führt, ist einfach. Es ist derselbe wie der (...) von den einfachen Maschinen zu den Wärmemaschinen, von der Mechanik zur Thermodynamik«.

(6) Ebd., S. 94.

(7) Gernot und Hartmut Böhme, *Feuer, Wasser, Erde, Luft. Eine Kulturgeschichte der Elemente*, München 2004, S. 268f.: »Mit der Erfindung der Dampfmaschine ›setzte‹ eine Entwicklung ein, die zu einer Identifizierung der verschiedenen lebendigen Kräfte und einer Vergleichgültigung ihrer qualitativen Unterschiede führte. Die Dampfmaschine selbst ist das Symbol dieser Vereinheitlichung: Sie ist (...) eine Maschine, die die lebendige Kraft des Feuers zu nutzen erlaubt. Das geschieht aber, indem sie in die Kraft der Luft transformiert wird – nämlich in die Spannkraft des Dampfes, und diese wird wiederum in mechanisch-lebendige Kraft umgesetzt, später dann diese durch Generatoren wiederum in elektromotorische Kraft. Es ist der Satz von der Erhaltung der Energie, (...) der in der Technikgeschichte die Vier-Elementenlehre zu ihrem Ende führt – die Kräfte des Feuers, des Wassers, der Erde und der Luft – all das ist im Grunde Energie«.

der Dampfmaschine läuft jeder Morphologie zuwider; sie zersetzt die individuelle Gestalt der Dinge und wandelt sie in pure Energie um. Letztendlich arbeitet sie gegen die visuelle Diversität der Umwelt an, denn alles endet in unförmigen Dampf- und Rauchwolken, alles ist dann Bewegung. Wenn sich jede materielle Form in Energie auflöst, werden aber nicht nur feste Umrisse, Zeichnung und Geometrie desolat, es werden gänzlich neue Darstellungsformen nötig, um die befreiten Spannkkräfte sichtbar zu machen.

Wie also lässt sich das unruhige Oszillieren zwischen Morphose und binärem Code bewerten, das sich im frühindustriellen Milieu anbahnte, damals aber noch in der Schwebel gehalten wurde? Der Weg führte von der Wolkengestalt zum einzelnen Regentropfen und weiter zum winzigen Aerosol und die bauschige Wolke zerfiel in diskrete Zeichen, Tropfen oder Partikel. So gesehen sind die Versuche der Troposphärenforscher, Wolkenformationen in Pixel zu überführen und auf computertechnischem Weg zu simulieren, ganz folgerichtig. Die Energiestöße der Wolke, die bei Turner in kraftvollen Farbwirbeln endeten, verwandeln sich bei ihnen in elektronische Ladungen, die auf dem Computerbildschirm zukünftige Wolkenverläufe visualisieren.

Wolken ziehen wollen⁸

Wolkenmodellierer haben es also zuerst mit Tropfen-, nicht mit Wolkenbildungen zu tun. Die diskreten Zeichen zu Gesamtverläufen zu verbinden ist dagegen Ziel der Wolkensimulationsverfahren auf den Parallelrechnern/Supercomputern des *Zentrums für Datenverarbeitung* in Mainz und dem *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)* in Oberpfaffenhofen.⁹ »Hier geht man von einem Säulenmodell der Luft- bzw. Wolkenschichten aus, d. h. von der Annahme, dass die Atmosphäre horizontal homogen ist. Einbezogen in das Modell werden auch die Luftschichten oberhalb und unterhalb der Wolke. In jedem Säulensegment wird am Ausgangspunkt der Simulation eine bestimmte Verteilung von Aerosolpartikeln (trockene Schwebeteilchen) unterschiedlicher Größe angenommen. Kommt es nun zu einer relativen Feuchte von wenig mehr als 100 %, dann entsteht aus diesen Aerosolteilchen durch Kondensation ein Größenspektrum von Wolkentropfen.«¹⁰ Soweit ist uns das Programm bereits von *LACIS* bekannt, dessen Aufgabe, die mikrophysikalische Simulation von Wolken einzuleiten, dazu geführt hat, trockene Schwebeteilchen unter verschiedenen Bedingungen und in verschiedenen Zeiträumen zu Wassertropfen anwachsen zu lassen. Dabei hatten wir es im Grunde mit Einzelstudien zu tun, denn die genormte Partikeldefinition erzeugt kategoriale Prognosen von Tropfenbildungen. *LACIS* lässt feststellen, welche Aerosole als günstige und welche als ungünstige Keime für die Wolkenentstehung zu gelten haben. Im Weiteren geht es aber um die Prognostizierbarkeit von Formverläufen – und damit um die Rückkehr zur ganzen Wolkengestalt. Um sie vollständig zu erhalten, ist es notwendig, eine prinzipielle Stoff- und Materievernichtung einzuleiten; das nebulöse Ding wird durch den Wolkenreaktor

(8) Vgl. Sigmar Polke, *Hoffen heißt Wolken ziehen wollen*, 1992, Lack auf Polyestergewebe, 300 x 500 cm, National Gallery, Washington.

(9) Zentrum für Datenverarbeitung an der Universität Mainz und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen bei München.

(10) Siehe <http://www.zdv.uni-mainz.de/JoguBits/19/parallel119.html>: »Auf den Parallelrechnern des ZDV sind als Standard die Programme Gaussian und Turbomole installiert, mit denen insbesondere für die Chemie molekulare Strukturen unter verschiedenen Bedingungen simuliert werden können«. (Ebd., S. 1).

geschickt, wo es in seine atomaren Bestandteile zerfällt. Wenn es im Anschluss neu aufgebaut wird, dann als numerisches Modell, dessen Existenz sich allein den algorithmischen Prognoseformeln der Superrechner verdankt. Das Gedankenexperiment kehrt sich jetzt um, eine neue Wolke entsteht aus der gesprengten Materie wie ein Atompilz und präsentiert jenes ambivalente Aussehen zwischen Weichheit und kristalliner Klarheit, das die meteorologischen Untersuchungen von Anfang an begleitet hatte. Das aber bedeutet zugleich, dass das Problem der visuellen Unterscheidbarkeit von Wolke und Nichtwolke von thermodynamischen Gleichungssystemen abgelöst wurde und damit in erster Linie gar kein formales Problem mehr darstellt. Stattdessen sind ganz andere Fragen daraus hervorgegangen. Man sucht beispielsweise nach den Graden von Feuchtigkeit und Empfänglichkeit der Luft und ihrer einstmals trockenen Schwebeteilchen. Das Wissen, dass bei einer kritischen Sättigung der Aerosole ein Wolkentropfen wächst, lässt ein anderes Bild der Wolke entstehen als die formalanalytische Klassifikation der frühen Wettervorhersagen. Nun wirkt sich tatsächlich die quantifizierbare Zusammensetzung auf die formalen Eigenschaften aus, denn es geht um die spezifische Zu- oder Abnahme des Wasserstoffgehalts innerhalb der Temperaturschichten der Troposphäre, die die Wolke zum *cumulus*, *cirrus* oder *stratus* werden lässt. Wenn das gesamte Partikeluniversum des Himmels auf diese Weise zur generativen Matrix – zur Gebärmaschine – für alle möglichen Wolkenverläufe gerät, ähnlich einem Dampfkessel, aus dem immer neue Metamorphosen hervorgehen, dann hat das noch immer den Anschein von materieller Anschaulichkeit. Sie geht verloren, wenn der Kondensationsvorgang numerisch erfasst wird. Von der warmfeuchten Substantialität der turbulenten Wolke bleibt in der Computersimulation natürlich keinerlei Restwärme übrig, das Temperaturgefälle, das als Voraussetzung aller realen Wolkenbildungen unabdingbar erscheint, ist vollkommen aus der *black box* der Superrechner verschwunden bzw. in codierte Zahlenkolonnen abgezogen worden. Die Homogenisierung durch die Zahl hat zuletzt zur Folge, dass, wo energetische Spannungen am Werk waren, also ein polares Gefälle herrschte, nun egalisierte Pixel walten.

Demnach ist es kein Wunder, dass sich auf kunstwissenschaftlichem Gebiet vor allem Vertreter der formalen Ästhetik mit den nebulösen Eigenschaften der Wolke auseinandergesetzt haben. Das symbolträchtige Schwanken der Wolkenform zwischen Umriss und Diffusität wiederholt sich im stilgeschichtlichen Grundbegriffspaar von linearen und malerischen Werten in der bildenden Kunst. Hierbei geht es vor allem um die Benennung zweier formaler Extreme: Jede bildliche Darstellung bewegt sich irgendwo im Entscheidungsraum zwischen Linie (bzw. Punkt) und diffusen Farbübergängen. Eine Wahl der Mittel hat relationslogische Konsequenzen, denn das Medium ist auch hier Ausdruck einer vorab eingenommenen Position und damit einer definitiven Perspektivierung des nebulösen Gegenstands. Bekanntlich lassen sich Verbindungen zwischen Malern wie William Turner oder John Constable und den frühen Versuchen der Meteorologie aufweisen. Basis dafür bot die thermodynamische Idee des Temperaturunterschieds und die Umsetzung solcher klimatologischen Werte in Farbe, die sich um keine Gegenstandsbeschreibung, sondern allenfalls um die Notation elementarer Kräfte oder atmosphärischer Werte kümmert.

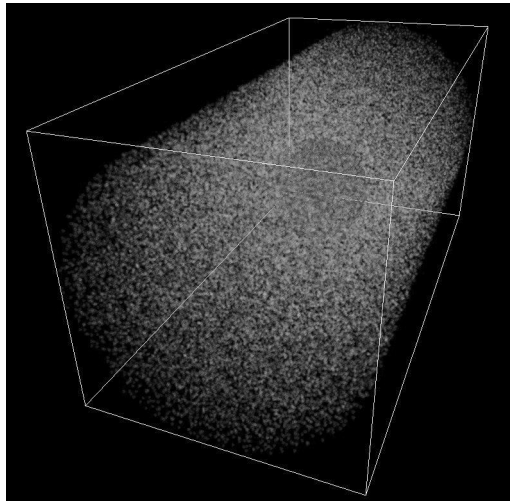


Abb. 3: Simulierte Elektronenwolke

Der Energetiker Turner hatte sich dabei einer anti-linearen Logik verschrieben und seine Bilder in malerische Farbwirbel und Flecken aufgelöst. In der computergestützten Wolkensimulation dagegen wird die Hinwendung zum Pixelpunkt aufgrund der atomisierten Wirklichkeitsvorstellung deutlich. Hier arbeitet man mit diskreten, beweglichen Teilchen, die in Systeme, und das heißt: in immanente Abhängigkeitsverhältnisse gebracht werden. Die dafür aufzubringende Rechenleistung potenziert sich auf diese Weise natürlich gewaltig. »Der größte Nachteil von Computersimulationen liegt in ihrem numerischen Aufwand. Wie erwähnt, muss man möglichst große Systeme, d. h. sehr viele Atome, simulieren, und dies über eine möglichst lange Zeit. In der Praxis ist man aber durch die Rechnerressourcen limitiert. Konkret bedeutet dies, dass man z. B. 8000 Atome über eine Zeitdauer von 20 Nanosekunden gerade noch simulieren kann. Selbst für diese sehr kurze Zeit sind auf den schnellsten existierenden seriellen Rechnern viele Jahre von CPU-Zeit nötig. Der Einsatz von Parallelrechnern ist unabdingbar.«¹¹

Ziel der Forschung ist die Simulation der zeitlichen Entwicklung einer Wolke auf atomistischem Niveau. Dem Aufbruch der totalen Form folgt deshalb eine Zerteilung der Bewegungsverläufe in Zeitquanten. An den Supercomputern der Universität Mainz beispielsweise wird eine Wolkenbildung über zwei Tage in kleinen Zeitschritten von ca. 5 Sekunden verfolgt. »Konkret wird dies so möglich gemacht, dass jeder Prozessor des Rechners für eine gewisse Anzahl der Teilchen ›verantwortlich‹ ist, d. h. die Bahn (Ort und Geschwindigkeit) dieser Teilchen berechnet.«¹² Das große System ›Wolke‹ wird demnach in Teilgruppen geordnet, die Ergebnisse der Parallelrechner werden wiederum korreliert.¹³ Die Schwierigkeit der Wechselwirkungen innerhalb

(11) Anm. 10, S. 4.

(12) Ebd.

(13) Zum Parallelisierungsvorgang siehe ebd., S. 2: »Parallelisiert hat Trautmann diesen Prozess, indem er verschiedene Säulensegmente per dynamischem ›load balancing‹ einzelner CPUs zuordnete. Eine starre Zuteilung hätte zur Folge, dass eine CPU mit einem ›unbewölkten‹ Säulensegment im Gegensatz zu Säulensegmenten mit einer Vielzahl von Wassertropfen nicht ausgelastet wäre. Load balancing bedeutet, dass für jeden Rechenschritt die CPU-Auslastung gemessen wird und auf dieser Grundlage die einzelnen Segmente der Säule neu auf die CPUs verteilt werden. Auf diese Weise wird die CPU-Auslastung bei jedem Rechenschritt korrigiert und nähert sich sehr schnell dem optimalen Wert. Seine Simulationen zeigen hervorragende Übereinstimmungen mit wolkenphysikalischen Messergebnissen und erlauben eine effiziente Simulation von Wolkenbildungsprozessen.«

eines Systems, die gegenseitige Anziehung der Wassertropfen beispielsweise oder die zunehmende Größe und Geschwindigkeit während des Falls, verkompliziert sich durch weitere, in die Rechnung miteinzubeziehende Größen wie Windgeschwindigkeit, Temperatur, solare Strahlung, turbulente Diffusion, Sedimentation und terrestrische Wärmestrahlung.¹⁴ Das ist ein Grund, warum sich Meteorologen zuweilen als Chaosforscher fühlen. Das Potenzial der Gebilde ist so groß, dass zukünftige Formverläufe schwer prognostizierbar sind. Wichtig ist dabei festzuhalten, dass das Wolkensimulationsprogramm zu diesem Zweck mit einem Säulenmodell arbeitet – Schleierluft und Wolkenfront also ebenso horizontal (Luftschichten) wie vertikal (Temperaturgefälle) durchschneidet. Der derart proportionierte und partikularisierte atmosphärische Haushalt ist damit bereit zur Wiederauferstehung im simulierten Bild, dem eine realitätsnahe Entstehung nachgesagt wird, sozusagen eine Wolke aus der Retorte darstellt.

Wie also verhalten sich der binäre Code der Softwaresprache, die ästhetische Kategorie des Malerischen und der symbolische Anflug des Numinosen zueinander? Und wo, zu guter Letzt, befindet sich die Schnittstelle zum lebenden Organismus, dem Menschen, und seiner Umwelt? In Zeiten, in denen die Umweltwissenschaften die Elemente als Thema zurückgewonnen haben und klimatologische Wolkenstudien in die Wissenschaften durchaus biopolitische Bedeutung implementieren, ist zugleich auch eine ökologische Ästhetik tragend geworden.¹⁵ Die zunehmende Gestaltung und Veränderung der Umwelt hat überhaupt erst jene Besinnung auf die Umgebungsqualitäten hervorgerufen, die inzwischen bedroht erscheinen; das Wolkenwachstum verliert seine ätherische Leichtigkeit, wenn man es mit Kohlenmonoxid in Verbindung bringt. So gesehen schlägt die quantifizierende Methode der Klimatologen sofort in ökologische Werte und damit in konkrete Eigenschaften um, die unsere Körper beeinflussen. Ob es sich um regionale Wettervorhersagen oder Prognosen, den Energiehaushalt des Systems Erde betreffend, handelt: Die Retortenwolken der Simulatoren sind Reflexe auf die künstlichen Wolken, Abgas- und Rauchwolken, auf die Dampfmaschinen des industriellen Zeitalters und die atomare Zerspaltung der Materie, sie sind ihr Double und Kontraprodukt, weil sie dazu dienen, das Treibhaus mit den Mitteln zu lüften, mit denen es beheizt wird. Gleichzeitig kann man sich keine geeignetere Methode vorstellen, ein systemimmanentes Verständnis klimatologischer Entwicklungen zu erreichen, als wenn man es, wie es schon Descartes postuliert hatte, auf einfachste Naturen – wie das Schwebeteilchen, den Wassertropfen – reduziert und dann von neuem aufbaut.



Abb. 4: Wolkenbau, diller und scofidio, Yverdon, Expo 2002

(14) Ebd.

(15) So zuletzt bei Gernot und Hartmut Böhme, *Kulturgegeschichte der Elemente* (2004), *op. cit.* zu lesen, sowie bei Gernot Böhme, *Atmosphäre*, Frankfurt/M. 1995, S. 13–16; vgl. auch ders., *Für eine ökologische Naturästhetik*, Frankfurt/M. 1993, ders., *Natürlich Natur. Über Natur im Zeitalter ihrer technischen Reproduzierbarkeit*, Frankfurt/M. 1992; Martin Seel, *Eine Ästhetik der Natur*, Frankfurt 1991.

In den Wolken

2002 lagerte über dem Neuenburger See bei Yverdon ein gewaltiges Wolkenbett, das vom Architektenbüro *diller & scofidio* und dem Wolkenbauer Urs Hildenbrand mit Hilfe eines riesigen Pumpwerks in der Schwebe gehalten wurde. Inzwischen wissen wir, dass es sich um immer neue Wolken-tropfenmengen handeln muss, die den Eindruck einer stehenden Formation erwecken. Mehr als 30.000 mikroskopisch kleine Düsen wurden angebracht, um das Seewasser zu Nebel zu zerstäuben. Durchmesser der Düsen, Wasserdruck und sich daraus ergebende Tropfengröße wurden vorab von meteorologischen Wolkenmodellierern berechnet: »The high-pressure spraying is carried out by high-grade steel jets with tiny apertures only 120 microns in diameter, through which the water is forced at a pressure of 80 bars onto fine needlepoints directly above the apertures and atomised into innumerable tiny droplets 4 to 10 microns in diameter. The droplets are so small that most of them remain suspended in the air. If sufficient jets are installed in a specific volume, they saturate the air with moisture and create the effect of mist or, in this case, the effect known as the blur.«¹⁶

Besucher wurden mit Regenmänteln ausgestattet, um die nebulös verhüllte Plattform zu betreten und ins Innere der Wolke vorzudringen. Tatsächlich lässt sich die Inszenierung auf der Schwelle zwischen Hightech und Naturästhetik verorten, wo die Elemente erst atomisiert bzw. egalisiert werden, um sie in einem zweiten Schritt erneut sinnlich erfahrbar zu machen. Die gewaltige Umwälzpumpe sichert den hydraulischen Kreislauf, der feine Sprühregen kondensiert zur Wolke und dem Besucher ist es nun möglich, die dynamisierten Elemente am eigenen Leib zu erfahren. Dass die Wolke, Symbol für alles Vage und Diffuse, durch technische Präzision und numerischen Aufwand erzeugt wurde, also das Ergebnis eines gewaltigen Rechenexempels ist, macht die Spannung aus, mit der sich Form und Formlosigkeit in diesem Beispiel die Waage halten. Die Wolke entsteht aus dem Nichts; allenfalls beschreibt sie einen Kreislauf, der sich trotz seiner augenblicklichen Evidenz zugleich entzieht und ungreifbar bleibt, weil das Prinzip der Entgrenzung der Wolkenbildung inhärent ist. Das stets neue Hervorbringen ihrer selbst und die Weigerung, sich auf eine Gestalt festzulegen, machen sie zum Symbol für die absolute Variabilität und Instabilität der Wahrnehmung des Betrachters, der hier sogar zum Besucher oder Raumbewohner wurde, und vergessen ist die Tatsache, dass dahinter Kalkül stand.

Touched by Light

Demnach hatte die Zersprengung der Materie nicht nur kristalline Modelle, sondern auch diffuse Gebilde zur Folge gehabt. Die Punkt- oder Rasterlogik der computergestützten Wolkensimulation erzeugt, wie im Beispiel des Neuenburger Wolkenbetts, durch präzisen Tropfenformalismus letztendlich jenen Effekt, der von der Presse als *the blur* und von den Wolkenin-

(16) <http://www.desingboom.com/eng/funclub/dillerscofidio.html>, S. 1.

nenraumbesuchern als visuelles Rauschen beschrieben wurde. Man muss an dieser Stelle fragen, inwieweit die Egalisierung des atmosphärischen Raums durch die Einführung des binären Codes tatsächlich eingetreten ist oder ob nicht umgekehrt transformierende Zwischenschritte übersehen wurden. Das Schweizer Wolkenbett über dem Neuenburger See war aus modellierenden Simulationsvorgängen im Wolkenlabor und ihrer Rückblendung in den Realraum entstanden. Hier hatten erneut die Temperaturen und klimatologischen Umstände der Umgebung eine Rolle gespielt. Ein noch unerwähnter Faktor für die simulierte Wolkenbildung ist deshalb die solare Lichteinstrahlung, die das alltägliche Wolkenbild wie selbstverständlich bestimmt. Für Umweltphysiker, deren numerisch generierte Klimaprognosen die optische Erscheinung der Wolke vernachlässigen können, stellt sie keinen entscheidenden Faktor dar. Gleichwohl gibt es Bemühungen, das durch den Wolkenreaktor geschickte Bild mit Licht- und Schattenwürfen plastisch zu modellieren; die dafür eigens erstellten Grafikprogramme konkurrieren mit ihrer jeweiligen rechnerischen Effektivität: »For clouds to look realistic, we must also simulate their interaction with light. We use an illumination approximation that incorporates self-shadowing and multiple forward light scattering, and implement it on the GPU using dynamic 3D texturing. We have integrated all of the techniques described above in an interactive flight application (...) that amortizes the high cost of slice-based volume cloud rendering by using dynamically-generated impostors«. ¹⁷ Der dabei vollzogene Schritt entspricht der Verwandlung der computersimulierten Wolkenbank zurück in SkyWorks, wie ein am Department of Computer Science in North Carolina entwickeltes Programm genannt wird, das heißt in »true 3D texture.« »As a test of this, we have integrated our cloud simulation into our SkyWorks cloud rendering engine. (...) SkyWorks was designed to render scenes full of static clouds very fast. It precomputes the illumination of the clouds, and then uses this illumination of

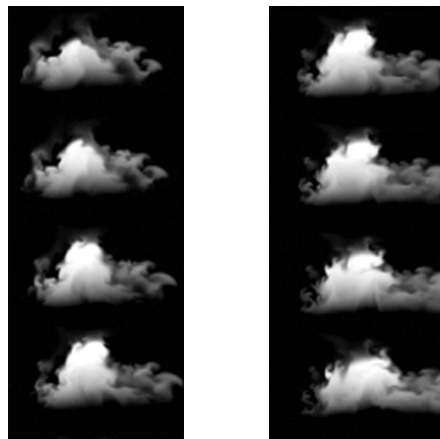


Abb. 5: Wolkensimulationssequenz mit Lichtmodellierung

(17) Harris, Baxter, Scheuermann, and Lastra, *Simulation of Cloud Dynamics on Graphics Hardware*, in: *Graphics Hardware* (2003), hg. V. M. Doggett, W. Heidrich, W. Mark und A. Schilling, S. 2; Vgl. auch ebenda: »Others in computer graphics have researched methods of simulating clouds. (Kajiya and Van Herzen 1984) used a simple method based on PDEs to generate cloud data sets for their ray tracing algorithm. (Dobashi, et al. 2000) used a simple cellular automata model of cloud formation to animate clouds offline. (Miyazaki, et al. 2001) extended this to use a coupled map lattice model based on atmospheric fluid dynamics. (Overby, et al. 2002) described another physical model that, like ours, is based on the stable fluid simulation of (Stam 1999). Of these, our work is most similar to the work by Kajiya and Von Herzen and Overby et al.«.

the clouds at run time«. ¹⁸ Dabei kommt erneut der schwierige Realismusbegriff ins Spiel, der die algorithmisierte Wolkenmodellierung von Anfang an begleitet hat. Harris, Baxter, Scheuermann und Lastra, die SkyWorks für ihre Simulationen ›in Echtzeit‹ benutzen, sind sich einig, dass ein illusionistischer Wolkeneffekt nur erreicht werden kann, wenn der atomisierten Gitterstruktur der Wolkensimulationen mit malerischen Werten entgegengearbeitet, sozusagen ein Weichzeichner unterlegt wird. »We also plan to improve the visual results of our simulation, (...) since the goal would be visual smoothing, not accuracy«. ¹⁹ Spätestens an dieser Stelle stoßen wir auf ein Problem der computergenerierten Wolkensimulation, das uns durch relationslogische Überlegungen innerhalb der Formalen Ästhetik, als Problem der sichtbaren Übergänge auf einer Bildeoberfläche bekannt ist. Demzufolge haben wir es mit einem kunstwissenschaftlichen Grundbegriffspaar von Klarheit und Unklarheit oder Vielheit und Einheit zu tun, das auch die Programmierung der Simulationstechniken bestimmt, ²⁰ denn diese Logik betrifft das Verhältnis von Teil und Ganzem in visuellen Medien. Auf diese Weise ließen sich Zusammenhänge zwischen der Entwicklung der formalen Logik und Ästhetik im 19. Jahrhundert, den Abstraktionsvorgängen in der Malerei der Jahrhundertwende und ihrer deutlichen Hinwendung zu klimatologischen und biometeorologischen Modellen, ²¹ den digitalen Grafik- und Bildverarbeitungsprogrammen zur Computersimulation von Wolkenformationen wie Sky Works, generell: ein Zusammenhang zwischen unsichtbaren Relationsgefügen und ihren sichtbaren Abstufungen neu überdenken.

Karin Leonhard lehrt an der Universität Ingolstadt.

(18) SkyWorks ist von Mark Harris am Department of Computer Science an der University of Carolina at Chapel Hill, North Carolina, USA, entwickelt worden

(siehe <http://www.markmark.net/SkyWorks/>, und: M. J. Harris und A. Lastra, A Real-Time Cloud Rendering, in: Proceedings of Eurographics (2001), Blackwell Publishers, S. 76–85, 2001).

(19) Harris, Baxter, et al., op. cit., S. 10.

(20) Vgl. hier beispielsweise Lambert Wiesing, Die Sichtbarkeit des Bildes. Geschichte und Perspektiven der formalen Ästhetik, Hamburg 1997, S. 105–116: ›Kunstgeschichtliche Grundbegriffe als Regler eines Computers‹.

(21) Vgl. in diesem Zusammenhang auch Wehry, Werner, und Ossing, Franz (Hg.), Wolken – Malerei – Klima in Geschichte und Gegenwart, Berlin 1997; Karin Leonhard, Klima-Räume. Kandinsky und die Biometeorologie, in: Barbara Lange (Hg.): Körperkonzepte (in Vorbereitung).