

## **Prozesse und Zirkulationen im nichtlinearen System Atmosphäre und deren Antriebsmotor**

Übersichtsvortrag zum Thema „Physik des Wetters“ auf der Fachschaftstagung Physik des Cusanusstift im Oktober 2006 in Bonn

### **Gliederung**

1. Nichtlinearität und Vernetzung, Modelle und Freiheitsgrade
2. Einfache Modellbildungen
3. Modellgleichungen
4. Fixpunkte, Vernetzung und Nichtlinearität
5. Repellen, Attraktoren, Störungen und die Nichtvorhersagbarkeit des Klimas
6. Lineare atmosphärische Verhaltensweisen
7. Die ideale Atmosphäre
8. Die reale Atmosphäre
9. Wechselwirkungen mit den Umgebungssphären der Atmosphäre
  - 9.1 Strahlungswechselwirkungen und Wolkenbildungen
  - 9.2 Wechselwirkungen mit der Hydro- Geo- Kryo- und Biosphäre
  - 9.3 Ordnungsstiftende Aspekte der atmosphärischen Umgebungssphären
10. Die Atmosphäre als Wärmekraftmaschine
11. Modifikationen durch die Erdrotation
12. Zur Wechselhaftigkeit des Wetters in den mittleren Breiten

### **1. Nichtlinearität und Vernetzung, Modelle und Freiheitsgrade**

Am physikalischen System „Atmosphäre“ kann man hervorragend lernen, was Nichtlinearität und Vernetzung bedeuten. Beide Eigenschaften werden dafür verantwortlich gemacht, dass in manchen System, wie z.B. in der Atmosphäre, unerwartete und paradox erscheinende Prozesse ablaufen. Nichtlinearität und Vernetzung sind in der realen Welt ganz normal. Aber was ist schon die reale Welt? Sobald man Gleichungen zur Beschreibung eines physikalischen Systems hinschreibt, betrachtet man nicht mehr die reale Welt, sondern nur noch ein *Modell* der realen Welt.

Jede Modellierung ist aber eine Vereinfachung der Wirklichkeit. Eine Modelleisenbahn ist einfacher als die Eisenbahn, und auch das allerbeste Wirtschaftsmodell wird immer einfacher sein als das reale Wirtschaftssystem. Sonst müsste man z.B. auch Gehirne modellieren, die Klingeltöne vermarkten. Ein weites gutes Beispiel für die Notwendigkeit, Vereinfachungen in Modellen vorzunehmen, liefert die Atmosphäre. Sie hängt von sehr vielen Variablen ab, wie Temperatur, Druck, Dichte, Windgeschwindigkeit, laminare und turbulente Viskosität, Feuchtigkeit, Staubgehalt, Gehalt an chemisch aktiven Schwebestoffen, an Strahlungsabsorbern, an Strahlungsemitenten. Die Atmosphäre wird beeinflusst durch Wechselwirkungen mit ihrer Unterlage aus Eis

(Kryosphäre), Wasser (Hydrosphäre), Erde (Pedosphäre), Gestein (Lithosphäre), Lebewesen (Biosphäre), sowie durch Wechselwirkungen mit der extraterrestrischen Sphäre, dem Weltall.

Eine globale Variable wie etwa die Klima-Mitteltemperatur repräsentiert nur einen einzigen *Freiheitsgrad*. Eine Feldvariable wie die ungemittelte Temperatur, wie das Strahlungsfeld, oder wie die Felder der Stoffeinträge in die Atmosphäre z.B. aus Vulkantätigkeit und Staubstürmen (Pedosphäre), Erdbeben (Lithosphäre), der Industrie (Biosphäre) kann aber in jedem Raumpunkt einen anderen Wert annehmen. Feldvariable haben unendlich viele Freiheitsgrade!

Da kein Computer unendlich viele Freiheitsgrade berechnen kann, *muss* bei der Modellierung vereinfacht werden. Z.B. werden Die Feld-Freiheitsgrade nur an den Kreuzungspunkten eines Rechengitters berücksichtigt. Eine diskretisierte Feldvariable hat dann nur noch so viel Freiheitsgrade, wie das Gitter Kreuzungspunkte hat. Wenn ein Modell nur globale Variable enthält, sind die Bezeichnungen "Variable" oder "Freiheitsgrade" gleichwertig. Wenn aber Feldvariable berücksichtigt werden, müssen auch die Wechselwirkungen zwischen den Freiheitsgraden der *gleichen* Feldvariablen berücksichtigt werden. Wir verwenden daher vorwiegend den immer zutreffenden Begriff "Freiheitsgrad".

## 2. Einfache Modellbildungen

Einfachste Modelle arbeiten nur mit wenigen globalen Variablen, haben also nur wenige Freiheitsgrade. Insbesondere hier werden Nichtlinearität und Vernetzung nicht immer beachtet. Als Beispiel betrachten wir ein Klimamodell, welches zwei globale Variable hat. Die beiden Freiheitsgrade seien die Klima-Mitteltemperatur und der Wolkenbedeckungsgrad. Die Wolkenbedeckung soll im Modell frei einstellbar sein, so dass nur noch modelliert werden muss, *wie* die Klimatemperatur vom vorgegeben Wolkenbedeckungsgrad abhängt. Und da lässt sich der Klimatologe A, unser „Modellmacher“, von einer physikalischen Überlegung leiten:

Klimatologe A: *"Wenn die globale Wolkenbedeckung zunimmt, wird es wärmer, weil dann der Treibhauseffekt stärker wird"*.

Wenn also der Computer mit diesem Modell im Vergleich zu den Messungen eine zu niedrige Klima-Temperatur ausrechnet, wird der Klimatologe die Wolkenbedeckung vergrößern, um das Modell zu korrigieren. - Sein Kollege bestreitet das aber. Er will genau das gegenteilige Modell entwerfen. Und auch er hat gute physikalische Gründe:

Klimatologe B: *"Wenn die globale Wolkenbedeckung abnimmt, wird es wärmer, weil dann zusätzliche Sonnenenergie von der Atmosphäre und vom Erdboden absorbiert werden kann, welche vorher an der größeren Wolkenobergrenze ungenutzt reflektiert wurde"*.

Das Fachwort für die Reflexion der Solarenergie heißt „Albedo“. Woher kommt nun dieser Widerspruch? Der Fehler liegt darin, dass eine monokausale Beziehung zwischen einer Ursache und einer Wirkung vorausgesetzt wurde, obwohl die Atmosphäre ein *vernetztes* System ist. Die willkürliche Vorgabe der Wolken hat die Vernetzung, die interne Wechselwirkung zwischen Wolkenbedeckung und Temperatur, unterbrochen! - Zwar kritisiere ich die gegenwärtige Klimadiskussion, solche Modellvorgaben wie eben beschrieben habe ich aber noch nicht erlebt. Aber erfunden habe ich sie auch nicht, sondern wortwörtlich übernommen aus äquivalenten, *ganz ernst gemeinten*, Diskussionen zwischen Wirtschaftspolitikern. Das Wirtschaftssystem ist ja ebenfalls nichtlinear und vernetzt. Doch vermutlich kennt ein jeder Fernsehdiskussionen nach dem obigen Schema:

Wirtschaftler A: *"Wenn wir Steuern erhöhen, schaffen wir einen Wirtschaftsaufschwung, weil dann Nebenkosten gesenkt werden und mehr investiert wird"*.

Wirtschaftler B: *"Wenn wir Steuern senken, schaffen wir einen Wirtschaftsaufschwung, weil dann die Kaufkraft der Verbraucher steigt"*.

Da man auch Steuern nicht gleichzeitig erhöhen und erniedrigen kann, haben wir hier das gleiche Problem wie beim nicht ganz ernst gemeinten Klimamodell. Die Lösung kennen wir schon: Wenn man wissen will, ob Wolken die Atmosphäre anheizen, *oder* ob Steuern die Wirtschaft anheizen, dann reichen Modelle mit monokausalen, einseitig gerichteten Beziehungen nicht aus! Auch eine *nichtlineare* Funktion für die Abhängigkeit der Temperatur vom Wolkenbedeckungsgrad würde an der Unterbrechung der Vernetzung nichts ändern.

### 3. Modellgleichungen

Um präziser zu beschreiben, was Nichtlinearität und Vernetzung bedeuten, bezeichnen wir die globale Temperatur mit  $x$  und die globale Wolkenbedeckung mit  $y$ . Dann lauten die *allgemeinsten* Modellgleichungen für ein Modell, welches nur diese beiden Freiheitsgrade berücksichtigt:

$$dx/dt = f_1(x,y) ; \quad dy/dt = f_2(x,y)$$

Die Funktion  $f_1$  beschreibt den Einfluss, den *beide* Freiheitsgrade auf die zeitliche Änderung der Temperatur haben, und  $f_2$  beschreibt den entsprechenden Einfluss auf die Entwicklung der Wolkenbedeckung. Da zwei Freiheitsgrade berücksichtigt wurden, spricht man auch von einem zweidimensionalen Modell, obwohl natürlich die modellierte Atmosphäre nach wie vor dreidimensional ist. Gemeint ist vielmehr, dass der abstrakte Raum der Freiheitsgrade zweidimensional ist, der sogenannte Gibbs'sche *Phasenraum* des Modells, auch Zustandsraum genannt. Es ist ein Raum, dessen Koordinaten die *Freiheitsgrade* bezeichnen, von denen das Modell abhängt. Ganz allgemein bedeuten „Zahl der Freiheitsgrade eines Modells“, „Dimensionszahl eines Modells“ und „Dimension des Phasenraumes eines Modells“ das gleiche.

Die Vernetzung zwischen den Freiheitsgraden zeigt sich hier ganz deutlich: Jeder Freiheitsgrad hängt von sich selbst ab (direkte Rückkopplung,  $x \rightarrow x$ ,  $y \rightarrow y$ ) und von dem jeweils anderen Freiheitsgrad (Kopplung  $x \rightarrow y$ ,  $y \rightarrow x$ ). Auch *indirekte* Rückkopplungen sind enthalten, da ja z.B.  $x$  den Freiheitsgrad  $y$  verändert, und das veränderte  $y$  dann auch wieder  $x$  ( $x \rightarrow y \rightarrow x$ ,  $y \rightarrow x \rightarrow y$ ).

*Nichtlinear* ist dieses Modell, wenn mindestens eine der beiden Einflussfunktionen  $f_1$  und  $f_2$  nichtlinear ist. Nichtlinearität und Vernetzung sind also nicht das Gleiche. Es ist ja offenbar ein Unterschied, danach zu fragen, ob die Funktionen  $f_i$  nichtlinear sind, oder ob die Argumente dieser Funktionen Vernetzungen enthalten. Erst beides zusammen begründet die *Komplexität* eines Systems, was im obigen fiktiven Klimamodell mit dem *konstant* vorgegebenen Wolkenbedeckungsgrad nicht der Fall war. Dieses Modell vereinfacht nämlich die obigen Gleichungen zu

$$dx/dt = f_1(y) ; \quad dy/dt = 0$$

Die Vernetzung ist verloren gegangen, es ist nur noch die monokausale Wirkung ( $y \rightarrow x$ ) von  $y$  auf  $x$  übrig geblieben. - Man kann aber auf eine Vernetzung auch dadurch verzichten, dass man von vornherein ein eindimensionales Modell betrachtet, also nur einen einzigen Freiheitsgrad berücksichtigt:

$$dx/dt = f(x)$$

Die Modellvorstellung hierzu ist die, dass die Temperatur  $x$  bestimmt, ob sich Schnee- und Eisflächen neu bilden oder ob sie schmelzen. Die Größe dieser Flächen hat tatsächlich einen Einfluss auf die weitere Temperaturtendenz, denn sie reflektieren die Solarenergie ebenso wie Wolkenobergrenzen und beeinflussen daher den Strahlungsanteil, der absorbiert und zur Erwärmung genutzt werden kann. Wenn sie schmelzen, weil es wärmer geworden ist, wird mehr absorbiert als vorher, und es wird noch wärmer. Ein analoges eindimensionales Wirtschaftsmodell, das zudem noch linear ist, hat in den frühen 70er Jahren der Club of Rome propagiert und mit dem Ergebnis eines "exponentiellen Wachstums" sogar Furore gemacht. Das Wirtschaftswachstum  $x$  sollte proportional vom Wirtschaftswachstum abhängen:

$$dx/dt = ax$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung ist mit der Bedingung  $x(t=0) = x_0 = 1$  ist die Exponentialfunktion  $x(t) = e^{at}$ . Im Falle  $a > 0$  erfolgt ein Anstieg der  $x$ -Werte im Zeitintervall  $t = -\infty, \dots, +\infty$ , von 0 bis  $\infty$ . Im Falle  $a < 0$  erfolgt im gleichen  $t$ -Intervall ein Abstieg von  $x$  von  $\infty$  bis 0.

Das zeigt übrigens, dass die Lösung des linearen Modells nichtlinear ist. Nichtlineare Modelle sind also nicht dadurch charakterisiert, dass der Freiheitsgrad  $x(t)$  nichtlinear von der *Zeit* abhängt, sondern dadurch, dass die Einflussfunktion  $f(x)$  nichtlinear vom Freiheitsgrad  $x$  abhängt. In vernetzten Modellen müssen einige der Einflussfunktionen

$f_i(x)$  nichtlinear von *den Freiheitsgraden* abhängen. - Betrachten wir ein weiteres eindimensionales und daher unvernetztes, diesmal aber *nichtlineares* Modell, z.B.

$$dx/dt = x(1-x)$$

Das ist die berühmte logistische Gleichung. Im offenen  $x$  - Intervall  $(0,1)$  ist offenbar  $dx/dt > 0$ ,  $x(t)$  von  $x=0$  ausgehend wächst  $x$  also an. Das Wachstum ist aber nicht mehr exponentiell, sondern es wird bei  $x = 1$  beendet, weil dort  $dx/dt = 0$  ist. Die Nichtlinearität simuliert also die "logistischen" Grenzen des Wachstums.

#### 4. Fixpunkte, Vernetzung und Nichtlinearität

Wenn man in explizit gegeben Modell - Differentialgleichungen die zeitlichen Änderungen der Freiheitsgrade Null setzt, bekommt man stationäre, algebraische Gleichungen, deren Lösungen spezielle Werte der Freiheitsgrade ergeben, die sich dynamisch nicht ändern können. Das sind sogenannte Fixpunkte im Phasenraum. Die stationäre Gleichung zu der sehr einfachen linearen Modellgleichung  $dx/dt = ax$  ist  $0 = ax$ , und die Lösung ist  $x=0$ . Dieser Punkt im eindimensionalen Phasenraum kann also dynamisch, d.h. aufgrund der Modellgleichung, nicht verlassen werden.

Im Falle der quadratisch nichtlinearen logistischen Gleichung  $dx/dt = x(1-x)$  lautet die Fixpunktgleichung  $0 = x(1-x)$ . Sie ist quadratisch nichtlinear und hat daher *zwei* Fixpunkte, nämlich  $x = 0$  und  $x = 1$ , wie man sofort sieht. Es kann aber auch vorkommen, dass die beiden Lösungen einer eindimensionalen quadratisch nichtlinearen Fixpunktgleichung zusammenfallen.

Kehren wir zurück zum allgemeinen Modell mit zwei Freiheitsgraden,  $dx/dt = f_1(x,y)$ ,  $dy/dt = f_2(x,y)$ . Hier muss man untersuchen, ob es *Kombinationen* von  $x$ - und  $y$ -Werten gibt, für die  $dx/dt$  und  $dy/dt$  Null werden. Das wären also unveränderliche Werte der zweidimensionalen Zustandspunkten. Diese Fixpunkte können sich in der Phasenebene nicht ändern. Ein konkretes lineares ad hoc Beispiel wäre:

$$dx/dt = 2x + y - 3, \quad dy/dt = x - 2y - 4$$

Ein entsprechendes Beispiel für ein nichtlineares zweidimensionales Modell wäre

$$dx/dt = x^2 + 2y - 4, \quad dy/dt = x - y^2 - 1$$

Wie man aus den entsprechenden linearen Fixpunktgleichungen

$$0 = 2x + y - 3; \quad 0 = x - 2y - 4$$

sofort ausrechnen (oder durch Einsetzen sofort bestätigen) kann, hat das lineare Modell einen Fixpunkt mit den Werten

$$x = 2, \quad y = -1$$

Um die gleiche Rechnung mit dem nichtlinearen Modell durchzuführen, beginnen wir mit den entsprechenden *nichtlinearen* Fixpunktgleichungen,

$$0 = x^2 + 2y - 4, \quad 0 = x - y^2 - 1.$$

Aus der zweiten Gleichung gewinnen wir  $x = y^2 + 1$ . Das setzen wir vorne ein,

$$0 = (y^2 + 1)^2 + 2y - 4,$$

d.h. wir müssen diese quadratische Gleichung noch einmal quadrieren und erhalten dabei eine nichtlineare Gleichung 4. Grades. Nichtlineare Gleichungen 4. Grades haben 4 verschiedene Lösungen, wenn keine Lösungen zusammenfallen. So bekommen wir am Ende der Prozedur schon bis zu 4 Fixpunkte, (deren konkrete Werte hier nicht interessierten). - Bisher können wir also folgendes über die Anzahl von Fixpunkten in eindimensionalen und zweidimensionalen Modellen sagen:

Lineare eindimensionale Modelle haben einen Fixpunkt

Quadratisch nichtlineare eindimensionale Modelle haben bis zu zwei Fixpunkte

Lineare zweidimensionale Modelle haben einen Fixpunkt

Quadratisch nichtlineare zweidimensionale Modelle haben bis zu vier Fixpunkte

Wählen wir nun ein dreidimensionales Modell, also ein Modell mit drei Freiheitsgraden, so erhält man drei quadratisch nichtlinearen Einflussfunktionen in den Freiheitsgraden  $x$ ,  $y$  und  $z$ . Die entsprechenden stationären Gleichungen haben sogar bis zu 8 Fixpunkte, denn die Gleichung 4. Grades muss ja beim Einsetzen in die *dritte* Gleichung *noch einmal* quadriert werden.

Im linearen Modell würde die Hinzunahme weiterer Freiheitsgrade an der Zahl der Fixpunkte nichts ändern. Lineare Gleichungen haben nun einmal nur *eine* Lösung, egal wie umfangreich das vernetzte Gleichungssystem ist. Bei zunehmender Zahl der Freiheitsgrade steigt in linearen Modellen nur die Anzahl der *Koordinaten* des *einen* Fixpunktes an, nicht aber die Anzahl der *Fixpunkte*. Das ist der entscheidende Unterschied zu nichtlinearen Modellen! Dort kann sich ja die Zahl der Fixpunkte bei jedem neu hinzukommenden Freiheitsgrad verdoppeln, also bei jeder Erhöhung der Dimensionszahl um 1! Dieses Verdopplungsschema der Fixpunktzahl kennzeichnet geradezu das Wesen der nichtlinearen Physik.

Wir halten also fest: *Nur bei nichtlinearen Modellen* führt eine zunehmende Vernetzung zu einer Zunahme der Zahl der Fixpunkte, die nach dem Verdopplungsschema sogar äußerst rasant erfolgen kann. Bei vernetzten aber linearen Modellen bleibt es bei einem Fixpunkt. Daher gehört Vernetzung *und* Nichtlinearität zur Komplexität. sind sie nicht komplex.

## 5. Repelloren, Attraktoren, Störungen und die Nichtvorhersagbarkeit des Klimas

Wie wir bei der ersten Diskussion der eindimensionalen linearer Modellgleichung  $dx/dt = ax$  gesehen haben, wird der Fixpunkt  $x=0$  im Falle  $a>0$  exponentiell verlassen.

Der Fixpunkt heißt daher *Repellor*. Der Zustand wandert ja auf der Zahlengeraden, d.h. im Phasenraum eines eindimensionalen Modells, nach  $x \rightarrow \infty$ . Im Falle  $a < 0$  jedoch nähert sich der Zustandspunkt von  $\infty$  kommend dem Fixpunkt  $x=0$ . Er heißt dann *Attraktor*. - Betrachten wir noch einmal die logistische Gleichung, Offenbar ist dort

$$\begin{aligned} dx/dt &< 0 & \text{falls } x < 0 \\ dx/dt &= 0 & \text{falls } x = 0 \\ dx/dt &> 0 & \text{falls } 0 < x < 1 \\ dx/dt &= 0 & \text{falls } x = 1 \\ dx/dt &< 0 & \text{falls } x > 1 \end{aligned}$$

Die beiden Fixpunkte  $dx/dt = 0$  und den Anstieg  $dx/dt > 0$  zwischen ihnen haben wir schon besprochen. Aber außerhalb des Intervalls  $[0,1]$  ist  $dx/dt$  offenbar immer negativ. Daraus entnimmt man, dass der Fixpunkt  $x=0$  nach beiden Seiten hin verlassen wird, der Fixpunkt  $x=1$  aber von beiden Seiten her angesteuert wird. Daher ist der Fixpunkt  $x=0$  einen Repellor und den Fixpunkt  $x=1$  einen Attraktor. Also: Lineare Gleichungen wie  $dx/dt = ax$  haben einen Fixpunkt, der entweder ein Repellor *oder* ein Attraktor ist, die nichtlineare logistische Gleichung  $dx/dt = x(1-x)$  hat zwei Fixpunkte, von denen der eine ein Repellor und der andere ein Attraktor ist.

Wir haben jedoch gesagt, dass sich ein Fixpunkt *nicht* ändern kann. Wie kann er dann verlassen werden, in beiden eben genannten Fällen? Repelloren werden zwar nicht aufgrund dieser Modellgleichungen verlassen, wohl aber bei *Störungen* des Zustandes. Störungen von Zustandspunkten sind Freiheitsgrade, die im System vorhanden sind, in den Modellgleichungen des Systems aber *nicht* berücksichtigt wurden. Wir sagten ja schon, dass die ursprünglichen physikalischen Systeme *mehr* Freiheitsgrade haben als ihre Modelle. Aber auch wenn Störungen im Modell nicht enthalten sind, existieren sie in der Realität.

Wenn eine solche Störung einen Fixpunkt verändert, *ist* er ja kein Fixpunkt mehr! Die Modellgleichung greift nun doch wieder *verändernd* ein und löst eine Rückkopplung aus, eine Rückkopplung vom gestörten Zustand  $x$  auf seine eigene zeitliche Änderung  $dx/dt$ . Diese Rückkopplung ist beim Repellor positiv, d.h. der Störabstand vergrößert sich noch mehr. Der Repellor ist *instabil* gegen Störungen. Und da Störungen immer vorhanden sind, werden Repellorzustände in der Natur so gut wie nie beobachtet. Die Rückkopplung ist beim Attraktor negativ, d.h. der Störabstand verringert sich wieder. Der Attraktor ist *stabil* gegen Störungen. Alle beobachteten Zustände in der Natur sind also fast immer gestörte Attraktorzustände. Das sind schwingungsähnliche Zustände.

Wenn jedoch eine Störung so groß ist, dass sie in der Logistischen Gleichung den Attraktor  $x=1$  bis hin zu einen Zustand  $x < 0$  verändert, dann kehrt er natürlich *nicht* mehr zum Attraktor zurück. Der Attraktor ist also nur gegen *kleinere* Störungen stabil. Daher nennt man ihn *metastabil*. Hier erkennen wir die erste Einschränkung der Vorhersagbarkeit eines Systems durch Modelle: Ob das Modell stabile Schwingungen durchführt oder instabil ist, hängt von der Stärke einer *zufälligen* Störung ab! Nun erkennen wir auch die eminente Bedeutung des Auftretens von vielen Fixpunkten in

*nichtlinearen mehrdimensionalen (vernetzten)* Modellen. Mit der Fixpunktzahl nach dem Verdopplungsschema steigt auch die Anzahl der Attraktoren, und je mehr Attraktoren den Phasenraum bevölkern, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine von einem Repellor ausgelöste Zustandsreise durch den Phasenraum durch irgendeinen Attraktoren wieder beendet werden kann, die Wahrscheinlichkeit also, dass der Zustandspunkt wieder eingefangen wird! Wenn also die Modelle nichtlinear sind, *und nur dann*, steigt mit zunehmender Vernetzung die Wahrscheinlichkeit, dass statt einer Instabilität des Systems ein *Attraktorwechsel* stattfindet. Die Nichtvorhersagbarkeit der Stabilität verwandelt sich immer mehr in eine Nichtvorhersagbarkeit des Attraktorzustandes, dessen Anziehungsbereich das Modellverhalten charakterisiert. Die zufallsbedingte Verhaltensvielfalt des Modells nimmt also in nichtlinearen Modellen mit dem Vernetzungsgrad rasant zu. Und daher ist es kein Wunder, dass die Atmosphäre eine unglaubliche Verhaltensvielfalt zeigt. Und da hier der Zufall der Störungen maßgeblich mitspielt, ist auch klar, dass diese Vielfalt durch Modelle nicht vorhergesagt werden kann. Die Störungs-Freiheitsgrade sind ja gerade dadurch definiert, dass sie *nicht* in den Modellgleichungen enthalten sind. Daher ist auch das Klima niemals durch Modelle berechenbar!

Dass in dieser Verhaltensvielfalt auch paradox erscheinende Entwicklungen möglich sind, erkennt man z.B. daran, dass ein von einem Attraktor eingefangener Zustandspunkt auch einen höheren Ordnungsgrad haben kann als der metastabile Attraktor, der vorher instabil geworden war. Das bedeutet nichts Geringeres, als dass die Beschreibung komplexer Prozesse im Phasenraum auch die Evolution verständlicher machen kann! Hier beginnt das weite Feld der Strukturbildungstheorien, der Synergetik und auch des damit zusammenhängenden deterministischen Chaos. In linearen Modellen hingegen gibt es nur einen Fixpunkt. Ist dieser ein Attraktor, so kann der Systemzustand immer nur durch Störungen von ihm weggedrängt werden und von der Dynamik wieder zurückgeholt werden. Ist der einzige Fixpunkt ein Repellor, so wird der Zustandspunkt auch von ihm durch Störungen weggedrängt, und die dann einsetzende Dynamik vergrößert den Abstand immer mehr.

Wir haben also die Verhaltensvielfalt der Atmosphäre zurückgeführt auf die Bewegung eines Zustandspunktes im hochdimensionalen Phasenraum. Die Komplexität der Atmosphäre im dreidimensionalen Ortsraum wird verschlüsselt durch die hohe Dimensionalität des Phasenraumes, in dem sich dann nur noch ein einziger Punkt bewegen muss. Dieser Zustandspunkt wird von sehr vielen Repelloren abgestoßen und von vielen Attraktoren angezogen, und er wird in diesem Umfeld ständig von zufallsbedingten Störungen hin und her gestoßen. Diese atmosphärische Komplexität solle nun durch viele Beispiele verdeutlicht werden.



## 6. Lineare atmosphärische Verhaltensweisen

Immerhin ist ein einziger Attraktor in linearen Modellen nicht so wirklichkeitsfremd wie das unendliche Wachstum der Entfernung von einem einzigen Repellor. Periodische Bewegungen in Attraktor - Nähe werden ja auch in der Natur beobachtet. Durch Linearisierung auch der meteorologischen Grundgleichungen, die wir als nächstes besprechen werden, kann man verschiedene Typen atmosphärischer Wellen beschreiben, die sich durch die Art der rücktreibenden Kräfte unterscheiden. Es gibt Schallwellen mit der rücktreibenden Kraft Kompressionsdruck, Schwerewellen mit der rücktreibenden Kraft archimedischer Auftrieb und Rossbywellen, deren rücktreibende Kraft mit der Erhaltung einer bestimmten Wirbelgröße zusammenhängt. Und es gibt alle denkbaren Mischtypen dieser atmosphärischen Wellen.

Die Rossbywellen sind meteorologisch gesehen die wichtigsten. Das sind die großräumigen wellenförmigen Druckverteilungen mit ihren Hochdruckkeilen und Tiefdrucktrögen, die sich meist langsam von West nach Ost verlagern. Daher kommt auch der Ausspruch „Das Wetter kommt von Westen“. Aber in linearen Modellen bleiben Wellen immer Wellen, der Wellen - Attraktor kann nicht verlassen werden, weil es keinen anderen Attraktor *gibt*. Lineare meteorologische Gleichungen können keine *Wellen - Instabilität* beschreiben, z.B. kein andauerndes Amplitudenwachstum bis hin zu einer Abschnürung einer geschlossenen Zyklone. Hierbei würde der metastabile Attraktor "atmosphärischer Wellenzustand" entstabilisiert und von einem Attraktor "Wirbelzustand" wieder eingefangen. Es fände eine „Zyklogenese“ statt. Dass zu ihrer Simulation der zweite Attraktor fehlt, zeigt die Grenzen der linearen Physik klar auf.

## 7. Die ideale Atmosphäre

Nun schauen wir uns die Gleichungen der theoretischen Meteorologie an, deren mögliche Linearisierung wir gerade erörtert haben. Wir beginnen mit der sogenannten *Idealatmosphäre*. Das ist ein Modell, das zwar noch keinen *Motor* für atmosphärische Zirkulationen hat, aber auch keine *Reibung*, welche die antriebslose Zirkulationen wieder bremsen würde. Würde man *nur* den Antrieb oder *nur* die Reibung weglassen, wäre der Fehler offenbar größer. Weiterhin fehlen dem Modell der Idealatmosphäre aber auch Wolken und der gesamte Wasserkreislauf. Die Idealatmosphäre ist eine *trockene* Atmosphäre. Sie hat dann noch 6 Feldvariablen  $x_i$ , und dafür auch 6 Feldgleichungen:

$$dx_i/dt = f_i(x_1, \dots, x_6), \quad i = 1, \dots, 6$$

Die 6 Feldvariablen  $x_i$  sind die Dichte  $\rho$ , die Temperatur  $T$ , der Druck  $p$ , sowie die zonalen, meridionalen und vertikale Komponenten  $v_x, v_y, v_z$  des Windvektors  $\mathbf{v}$ . Die reziproke Dichte  $1/\rho = \upsilon$  ist das spezifische Volumen  $\upsilon$ . Die Konkretisierung der obigen allgemeinen Gleichungen für die Felder soll nun vorgestellt werden, und die dazu

notwendige Mathematik wird plausibilisiert. Es schadet aber nicht dem weiteren Verständnis des Vortrags, wenn man den kurzen mathematischen Teil überspringt.

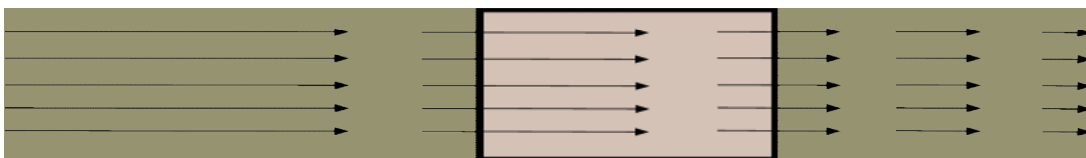
$$\begin{aligned} dp/dt &= -\rho \nabla \cdot \mathbf{v} && \text{Kontinuitätsgleichung} \\ dT/dt &= -(1/\rho c_v) p \nabla \cdot \mathbf{v} && \text{adiabatischer erster Hauptsatz} \\ 0 &= p - R\rho T \leftrightarrow p = R\rho T && \text{Zustandsgleichung idealer Gase, } \rho = 1/v \\ d\mathbf{v}/dt &= -(1/\rho)\nabla p - \nabla\Phi - 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} && \text{Bewegungsgleichung} \end{aligned}$$

Auf der linken Seite stehen die Änderungen von  $\rho$ ,  $T$  usw. Ein explizites  $dp/dt$  kommt in dieser *Spezialisierung* nicht vor. Die drei Gleichungen für  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$  sind zu einer Vektorgleichung für den Windvektor  $\mathbf{v}$  zusammengefasst worden, ebenso wie die drei räumliche Ableitungen  $\partial/\partial x$ ,  $\partial/\partial y$ ,  $\partial/\partial z$  der Felder zu einem Vektoroperator  $\nabla$  ("Nabla") zusammengefasst wurden. Auf der rechten Seite stehen die expliziten nichtlinearen Funktionen  $f_i$ , die die zeitlichen Entwicklungen der Felder bestimmen. Man erkennt viele Kopplungen und Rückkopplungen. Z.B. hängt in der ersten Gleichung die Dichteänderung vom Windvektor ab, und in der gleichen Gleichung *hängt* die Dichteänderung auch von der Dichte selbst ab. Auch Rückkopplungen - *Schleifen* sind zu beobachten, z.B. hängt in der letzten Gleichung die Windänderung von der Dichte ab, und in der ersten Gleichung ist es umgekehrt. Eine Dichteänderung führt wegen der zweiten Gleichung *auch* zu einer Temperaturänderung. Aber wenn sich die Dichte *und* die Temperatur ändern, muss sich wegen der dritten Gleichung auch der Druck ändern, *obwohl* das Gleichungssystem kein *explizites*  $dp/dt$  enthält.

Das innere Produkt  $\nabla \cdot \mathbf{v}$  zwischen dem Vektoroperator Nabla und dem Vektor  $\mathbf{v}$  bildet man wie üblich. So wie Vektor  $\mathbf{a}$  mal Vektor  $\mathbf{b}$  gleich  $a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$  ist, so ist auch

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \partial/\partial x v_x + \partial/\partial y v_y + \partial/\partial z v_z \equiv \partial v_x/\partial x + \partial v_y/\partial y + \partial v_z/\partial z$$

Das ist eine Divergenz des Windes, wie die folgende Skizze zeigt, auch wenn sie nur den *ersten* Summanden  $\partial v_x/\partial x$  veranschaulicht:



Wenn so wie in diesem Beispiel die Windkomponente  $v_x$  in  $x$ -Richtung immer kleiner wird, dann ist natürlich  $\partial v_x/\partial x < 0$ , und in den hellen Kasten strömt von links mehr Luft hinein als recht herausströmt. - Eine solche negative Divergenz nennt man auch Konvergenz. Wenn sich die  $y$ - und  $z$ -Komponenten ebenso verhalten, dann ist natürlich  $\nabla \cdot \mathbf{v} < 0$ . Eine solche Konvergenz steht aber auf der rechten Seite der beiden ersten Gleichungen, und das erklärt auch die durch diese Gleichungen zum Ausdruck gebrachte Physik: Wenn Luft konvergiert, wird sie auch *komprimiert*, und dann *muss* ja

die Dichte zunehmen, wie die Kontinuitätsgleichung behauptet, und die Temperatur steigt bei Kompression ebenfalls an, wie der erste Hauptsatz behauptet.

Wir nennen diesen ersten Hauptsatz *adiabatisch*, weil er *nur* diese *innere* Kompressionserwärmung berücksichtigt. Temperaturänderungen gibt es aber auch durch Wärme - Austausch mit *äußeren* Randsystemen. Eine solche Erwärmung von außen nennt man *diabatisch*. Diese ist hier aber vernachlässigt worden. Wir werden bald sehen, dass gerade deshalb auch der *Antrieb* der atmosphärischen Zirkulation vernachlässigt wurde. - Die Gasgleichung ist wohl allgemein bekannt, und die Newtonsche Bewegungsgleichung in hydrodynamischer Form enthält die Druckgradientkraft, die Schwerkraft und die Corioliskraft. Als Bewegungsgleichung der Ideal-Atmosphäre, die ja reibungsfrei ist, fehlt ihr allerdings noch die Reibungskraft.

Außer den 6 Feldvariablen enthält das Gleichungssystem noch Modellparameter:  $\Phi$  ist das Schwerpotential der Erde,  $R$  die Gaskonstante,  $c_v$  die spezifische Wärme bei konstantem Volumen, und  $\omega$  ist der Vektor der Erddrehung. Diese Größen verändern sich nicht durch die dynamischen Gleichungen. Wir haben also nur 6 Unbekannte und dafür 6 Feldgleichungen, also ein geschlossenes Gleichungssystem. Als gekoppeltes System nichtlinearer partieller Differentialgleichungen ist es allerdings analytisch nicht lösbar. Es muss numerisch gelöst werden unter Verwendung eines der schon besprochenen numerischen Gitternetze. Wenn man die Feldvariablen im geographischen Gitter an allen ganzzahligen Breiten- und Längengraden diskretisiert, und das in 5 Höhen, ergibt sich ein Modell mit  $6 \cdot 180 \cdot 90 \cdot 5 = 486\,000$  Freiheitsgraden.

Bis zu 1 ½ Tagen sind die Lösungen für atmosphärische Strukturen auf der planetaren Größenskala gar nicht so schlecht. Wenn wir dann im Ergebnis der numerischen Integration bekannte Wetterelemente wiederfinden, seien es Stürme, wandernde oder blockierende Hoch- und Tiefdruckgebilde, aus Westen herannahende Druckwellen mit Tiefdrucktrögen, aus denen sich Zyklonen abschnüren, so kann man sagen, dass sich all das so abspielen muss, weil die Natur gewisse Erhaltungseigenschaften beachten muss. Bis auf die empirische Zustandsgleichung basieren die Grundgleichungen der Idealatmosphäre nämlich auf physikalischen Erhaltungssätzen. Sie sind ihnen äquivalent! Die Kontinuitätsgleichung kann aus dem Massenerhaltungssatz hergeleitet werden, der Erste Hauptsatz aus dem Energieerhaltungssatz, und die Bewegungsgleichung aus dem Impulserhaltungssatz. Beim Massenerhaltungssatz ist das sogar direkt zu sehen: Wenn die Dichte bei dem oben skizzierten Netto - Massenzufluss in einen Kontrollkasten *nicht* zunähme, ginge ja Masse verloren! - Die Erhaltungssätze der Physik, oder, für Genießer, die nach dem Noether - Theorem hinter den Erhaltungssätzen stehenden Symmetrieeigenschaften von Raum und Zeit, *diktieren dem Modellbauer geradezu seine Gleichungen!* Verglichen mit den ad hoc - Annahmen unseres ersten Wirtschafts- und Atmosphärenmodells ist das eine äußerst befriedigende Objektivierung des Modellansatzes!

## 8. Die reale Atmosphäre

Die Gleichungen der Idealatmosphäre können Wolken, Regen, El Nino Phänomene, Monsune, Hurrikans usw. nicht beschreiben, weil all diese Phänomene nur unter Mitwirkung der Luftfeuchtigkeit möglich sind. Ferner kompensieren sich der atmosphärische Antrieb und die Reibungsdämpfung auf Dauer natürlich *nicht*. Leider ist die Modellierung der realen Atmosphäre dermaßen kompliziert, dass dabei notgedrungen die wunderbare Objektivität der soeben besprochenen Modellgleichungen wieder verloren geht.

Wie gesagt, ist es schon ein Unterschied, ob man den Antrieb und die Reibungsdämpfung modelliert oder beides einfach ignoriert. - Aber wie funktioniert überhaupt dieser Antrieb? Das allgemein bekannte Land-Seewindphänomen kann als Hinweis dafür dienen, wie dieser Antrieb der atmosphärischen Zirkulation erfolgt: er basiert auf einem diabatischen Wärmeaustausch der Atmosphäre mit unterschiedlich temperierten Unterlagen der Luft. An einer Küste herrscht am Tage Seewind, weil sich das Land schneller erwärmt als das Meer. Die über dem Land diabatisch erwärmte Luft will aufsteigen, und die diabatisch entstandene Kaltluft über dem Meer will absinken. Es entstehen Vertikalgeschwindigkeiten, die sich durch Horizontalwinde in der Höhe und am Boden zu einer Zirkulation schließen müssen. So kommt es *am Boden* zum Seewind. Nachts kehren sich die Verhältnisse um, denn das Land kühlt schneller aus als das Meer, und sobald es kälter ist als das Meer, ergibt sich ein Antrieb für eine entgegengesetzte Zirkulation, deren untere Horizontalströmung der bodennahe Landwind ist. Da ein diabatischer Wärmeaustausch im adiabatischen ersten Hauptsatz der Idealatmosphäre fehlt, enthält die Modellierung der Idealatmosphäre auch keinen Antrieb dieser *und anderer* atmosphärischer Zirkulationen.

Zur Simulation der Realatmosphäre muss also die adiabatische interne Kompressionserwärmung im ersten Hauptsatz ergänzt werden durch einen diabatischen Wärmeaustausch mit der *gesamten* atmosphärischen Umgebung, *nicht nur* mit Land- und Seeoberflächen. So schafft das Modell Temperaturunterschiede und damit nach dem beschriebenen Muster auch Zirkulationen, die dann aber durch den Einbau von Reibung in die Bewegungsgleichung auch wieder gedämpft werden müssen. Letzteres erfordert Turbulenztheorie und Tensorrechnung. Die Berechnung des turbulenten Reibungstensors ist nur näherungsweise möglich. Das ist das sogenannte, bis heute ungelöste Turbulenzproblem. Bei sehr feuchter Luft muss außerdem die ideale Gasgleichung durch eine reale Gasgleichung ersetzt werden, z.B. durch die van der Waals-Gleichung. Der Feuchtegehalt der Luft muss sowieso noch durch zusätzliche Differentialgleichungen beschrieben werden. Für Nichterhaltungsgrößen wie Wasserdampf, Spurengase, Hydrometeore, Aerosole, über hundert chemische Verbindungen benötigt man weitere Bilanzgleichungen, die nun aber auch Quellterme enthalten. Die Gleichungen der Idealatmosphäre bestehen ja im Wesentlichen aus Bilanzgleichungen von Erhaltungsgrößen, die *keine* Quellterme haben. Alles in allem wird die Modellierung sehr viel komplizierter und vor allem subjektiver. Die Summe aller

erforderlichen Maßnahmen ergibt am Ende Gleichungssysteme, in denen die Zahl der Variablen die Zahl der Gleichungen weit übertrifft. Das erweiterte Gleichungssystem ist also nicht mehr geschlossen. Man schließt es durch mancherlei Tricks und Vereinfachungen, die mehr oder auch weniger plausibel sind, und die weitere subjektive Komponenten enthalten und damit die schöne Objektivität der idealen Modellgleichungen endgültig zerstören. Alle diese Schließungsmaßnahmen fallen unter das Schlagwort „Parametrisierung“. Veröffentlichungen hierzu füllen ganze Bibliotheken.

## 9. Wechselwirkungen mit den Umgebungssphären der Atmosphäre

Die Wechselwirkung mit Land- und Seeoberflächen war nur ein erstes Beispiel für atmosphärische Randbedingungen. Die Atmosphäre ist jedoch von unten *und* von oben begrenzt, und die unteren Umgebungssphären umfassen *nicht nur* Land und Seeflächen. Hier ist eine Aufschlüsselung aller atmosphärischen Umgebungssphären, die das Verhalten der Atmosphäre beeinflussen:

Die extraterrestrische Sphäre: das Weltall (solare Strahlung, Kometeneinschläge)

Die Unterlage der Atmosphäre, aufgeschlüsselt nach

- Hydrosphäre: Flüssige Bereiche (Ozeane, Seen, sonstige Gewässer)
- Geosphäre: Feste Böden, und zwar „Erde“ (Pedosphäre) und Gestein (Lithosphäre)
- Kryosphäre: Eisbereiche
- Biosphäre: Einflussbereiche von Pflanzen, Tieren und Menschen

Die Wechselwirkungen der Atmosphäre mit diesen Umgebungssphären erhöhen einerseits die Vielfalt atmosphärischer Verhaltensweisen, sie üben aber andererseits auch Zwangsbedingungen aus, die das atmosphärische Verhalten ordnen. Im Restprogramm dieses Vortrags beschreibe ich zuerst die Komplexitäts- Zunahme der Atmosphäre durch Wechselwirkungen mit der oberen Umgebung, insbesondere mit der dort eintreffenden Solarstrahlung, dann ergänzen wir das Beispiel Land-Seewind durch weitere Wechselwirkungen von unten, und am Ende besprechen wir die ordnungsbildenden Eigenschaften der Umgebungssphären, insbesondere die Zwangsbedingungen, die die Atmosphäre zu einer Wärmekraftmaschine machen. Schließlich „leben“ ja auch technische Wärmekraftmaschinen von Kontakten mit Wärme- und Kältereservoirs, ihre Physik basiert also ebenfalls auf diabatischen Wechselwirkungen mit der Außenwelt des jeweiligen arbeitenden Mediums.

### 9.1 Strahlungswechselwirkungen und Wolkenbildungen

Die sogenannte kurzwellige *solare* Strahlung wird von der Atmosphäre und von ihrer Unterlage absorbiert. Natürlich kann der Temperaturstrahler „Erde“ wegen des Wienschen Verschiebungsgesetzes nur langwellige, aber keine kurzwellige Strahlung emittieren. Die sogenannte langwellige *terrestrische* Strahlung wird jedoch emittiert *und*

reabsorbiert. - Aber *welche Bestandteile* in der Atmosphäre absorbieren, und *welche* emittieren? Sowohl Strahlungsabsorber als auch Strahlungsemitter sind Wasserdampf und Spurengase sowie flüssige und feste Schwebestoffe, die man auch Hydrometeore und Aerosole nennt.

Langwellige Emission in der oberen Atmosphäre erfolgt nicht nur in den Weltraum hinaus, sondern als Gegenstrahlung auch in Richtung untere Atmosphäre und Erdboden, wo sie zusätzlich zur Solarstrahlung absorbiert wird. Das ist der *Treibhauseffekt*. Strömungen in der Atmosphäre verfrachten Feuchtigkeit und die anderen Absorber und Emittenten. Jetzt wird es kompliziert: Strömungen verfrachten nicht nur die Luft, sondern auch *die* Bestandteile der Luft, die die Erwärmung und damit den Strömungsantrieb erst verursacht haben! Wenn das keine schöne Rückkopplung ist! Das Temperaturfeld ist das Antriebsfeld für Strömungen, und das Strömungsfeld wirkt als Umverteilungsfeld der Absorber, die ihrerseits das Temperaturfeld verändern. M.a.W., Strömungen verändern den Strömungsantrieb, aber nicht als direkte Rückkopplung, sondern über eine Rückkopplungsschleife mit einem Umweg über das Temperaturfeld.

Der Clou ist aber, dass die Hydrometeore und die Aerosole nicht nur Strahlung absorbieren und emittieren, sondern dass sie auch Kondensationskerne sind, ohne die eine *Wolkenbildung* nicht möglich wäre. Von der komplizierten Rückkopplungsdynamik hängt also *auch noch* die gesamte Wolkenphysik ab, die unsere fiktiven Klimadiskutanten im Eingangsbeispiel einfach vorgegeben wollten. Und es kommen noch weitere Einflüsse hinzu: Die Wolkenbildung hängt auch von der Größe der Kondensationskerne sowie von ihren elektrischen und chemischen Eigenschaften ab!

Erst wenn die Wolken diesen komplizierten Entstehungsprozess hinter sich haben, verstärken sie durch ihr Absorptions-Vermögen im langwelligen Bereich den Treibhauseffekt, und vergrößern sie die Albedo durch ihre reflektierende Obergrenze. Ob der erwärmende Treibhauseffekt oder der abkühlende Albedoeffekt überwiegt, hängt auch noch von der Wolkenhöhe und vom Größenspektrum der Tröpfchen ab: Niedrige Wolken kühlen mehr als hohe Wolken, kleine Tröpfchen kühlen mehr als große Tröpfchen. Umgekehrt hängt das Tröpfchenspektrum vom Temperaturfeld ab, und dieses, wie wir inzwischen wissen, vom Absorberfeld, dieses vom Strömungsfeld, dieses vom Wärmekontakt mit den vielen Umgebungssphären, dieser von der internen Physik dieser Umgebungssphären usw. usw.! - Wir sehen also, dass die Atmosphäre von den vielfältigen Rückkopplungsmöglichkeiten, die wir im einleitenden Teil des Vortrags etwas „abstrakt“ beschrieben haben, reichlich Gebrauch macht. Dabei beschränkten wir uns bisher auf *einige* Wechselwirkungen, und auch nur mit der *oberen* extraterrestrischen Randsphäre der Atmosphäre. Wir sollten noch einige Beispiele für Wechselwirkungen mit den *unteren* Umgebungssphären hinzufügen. *Eine* Hydro- Geo- Wechselwirkung brachte uns ja schon den Land-Seewind. Aber es gibt noch mehr zu berichten.

## 9.2 Wechselwirkungen mit der Hydro- Geo- Kryo- und Biosphäre

Atmosphärische Temperaturen werden auch von Meeresströmungen beeinflusst, z.B. vom Golfstrom. Der Golfstrom ist aber nur ein Teilstück einer riesigen „thermohalinen Zirkulation“ (THZ), mit einer Tiefenströmung vom Nordatlantik bis zum indischen Ozean. Starker Salzgehalt macht das Wasser im Nordatlantik schwer, es fällt in die Tiefe und treibt so die ozeanische Zirkulation an. - Der Name THZ deutet ja auf diesen „Antrieb durch Salzgehalt“ hin. Eine Oberflächenströmung vom Indischen Raum zurück zum Nordatlantik schließt diese gewaltige Zirkulation, und der Golfstrom ist dessen letzter Abschnitt. Ein kompletter Umlauf dauert größenordnungsmäßig 1000 Jahre.

Der THZ - Antrieb geschieht im Nordatlantik, weil dort Gletscherbildung, also die Kryosphäre, mit Süßwasserentzug den Salzgehalt verstärkt und so auch den Antrieb der THZ. Das allein ist schon bemerkenswert: Wenn es kälter wird, bilden sich mehr Gletscher, steigt der Salzgehalt des Wassers, und damit der Antrieb der THZ mitsamt dem Golfstrom. Der Golfstrom aber erwärmt die Atmosphäre über dem Nordatlantik. Das ist ein Beispiel für eine negative atmosphärische Rückkopplung.

Häufiger diskutiert wird aber die Umkehrung dieses paradox erscheinenden Prozesses, nach dem Motto „wenn es wärmer wird, wird es kälter“: Bei einer globalen Erwärmung mit Gletscherschmelze, verursacht z.B. durch anthropogenes Treibhausgas CO<sub>2</sub>, wird ja Süßwasser wieder frei, was den Salzgehalt und damit den Antrieb der THZ schwächt oder zum Erliegen bringt. Dann aber werden die ehemals vom Golfstrom erwärmten Gebiete wieder kälter! Eine globale Erwärmung verursacht also eine lokale Abkühlung.

Aber es wird noch komplizierter: Das Tiefenwasser der ozeanischen Zirkulationen enthält gelöstes Treibhausgas CO<sub>2</sub> und entzieht es der Atmosphäre für Jahrhunderte. Und zudem reißen in der Tiefenzirkulation tote Schalentiere CO<sub>2</sub> auf den Meeresgrund und tragen zur Sedimentierung von CO<sub>2</sub> in der Lithosphäre bei. Dieses CO<sub>2</sub> kann der Atmosphäre für Jahrtausende entzogen sein. Erst Plattentektonik und Vulkantätigkeit fördern es irgendwann wieder zutage. Die Drift der Kontinentalplatten, die sogenannte Plattentektonik, bricht das karbonathaltige Gestein irgendwann wieder auf.

Schließlich entzieht auch die pflanzliche Photosynthese der Atmosphäre CO<sub>2</sub>. Bei der Assimilation werden aus CO<sub>2</sub>, zusammen mit Wasser und Solarstrahlung, letztlich Kohlenhydrate gebildet. Das ist ein Zusammenspiel der pflanzlichen Biosphäre mit der Solarstrahlung aus der extraterrestrischen Sphäre. In der Pedosphäre wird der durch Assimilation gebildete Kohlenstoff fossilisiert, später vom Menschen, also von der menschlichen Biosphäre, in Form von Kohle und Öl wieder verbrannt. Das dabei freigesetzte CO<sub>2</sub> ist der Kernpunkt der aktuellen Klimadiskussion. - Die beschriebenen Kohlenstoff - Speicherungen in der Hydro- Pedo- und Lithosphäre bedeuten keine Entwarnung, da sich diese Speicherungen in wesentlich größeren Zeitskalen vollziehen als die anthropoge CO<sub>2</sub> - Freisetzung. Sie sorgen erst nach Jahrtausenden bzw. nach Jahrtausenden für eine Temperaturregulierung durch negative, stabilisierende Rückkopplungen.

Nachdem wir nun die komplexe Vielfalt der nichtlinearen Atmosphäre und seiner Randsphären erläutert haben, wird es Zeit, auf die ordnungstiftenden Aspekte einzugehen, die es in diesem physikalischen System auch gibt:

### 9.3 Ordnungstiftende Aspekte der atmosphärischen Umgebungssphären

Die Randsphären der Atmosphäre geben mehr oder weniger konstante und daher ordnende Randbedingungen vor. Dazu gehören

- *Gleichbleibende Verteilung von Land und Meer mit ihren Einflüssen auf Temperatur und Feuchte der darüber liegenden Luft.*
- *Gebirgshindernisse für Strömungen*
- *Tag - Nachtrhythmus und Jahreszeiten als Taktgeber von außen.*
- *Meridionaler Verlauf der Bilanz von Einstrahlung und Ausstrahlung.*

Für den Rest des Vortrags beschäftigen wir uns nur noch mit dem letzten Punkt! Im globalen Mittel gleichen sich die solare Einstrahlung und die terrestrische Ausstrahlung aus. Wenn man jedoch zonale statt globale Mittelwerte bildet, differenziert man trotz der Mittelung noch immer nach Breitengraden, und hier gleichen sich die Bilanzen *nicht* aus. Wegen des schrägen Strahlungseinfalls ist der *Einstrahlungsgewinn* in den polaren Breiten geringer als am Äquator. Zwar nimmt wegen des Stefan-Boltzmann- Gesetzes auch der *Ausstrahlungsverlust* zum Pol hin ab, jedoch langsamer! Daher überwiegt in Polnähe der Ausstrahlungsverlust, in Äquatornähe der Einstrahlungsgewinn! Das nennt man Differentielle Erwärmung. Sie verstärkt Temperatur - Gegensätze, und sie ist daher ebenfalls ein ordnungstiftender Aspekt der Strahlungs -Randbedingung der Atmosphäre. Differentielle Erwärmung bedeutet ja, dass eine Netto-Erwärmung in den sowieso schon warmen äquatorialen Breiten erfolgt, und ein Netto-Abkühlung in den sowieso schon kalten polaren Breiten!

## 10. Die Atmosphäre als Wärmekraftmaschine

Differentielle Erwärmung ist das Antriebsprinzip aller atmosphärischen Zirkulationen und auch aller technischen Wärmekraftmaschinen, aller Motoren!

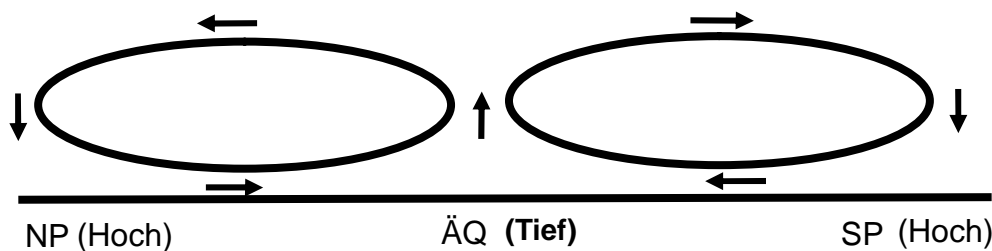
Ich hatte ursprünglich vor, diesen Punkt ausführlicher darzustellen. Aber das hätte die Vortragszeit zu stark belastet. Daher möchte ich Sie anregen, einmal die Carnotsche Wärmekraftmaschine unter dem Gesichtspunkt zu betrachten, bei welcher Temperatur sie diabatisch erwärmt bzw. gekühlt wird. - Sie werden feststellen: Das arbeitende Gas wird durch die Kontakte mit den Wärme- und Kältereservoirs *differentiell* erwärmt, denn das arbeitende Gas hat zu Beginn der diabatischen Erwärmung gerade eine adiabatische Kompressionserwärmung hinter sich, und zu Beginn der diabatischen Abkühlung gerade eine adiabatische Expansionsabkühlung! Das Gas der Wärmekraftmaschine steht also genau dann mit dem Wärmereservoir in Kontakt, wenn



es sowieso schon wärmer ist als im Durchschnitt, und sie steht dann mit dem Kältereservoir in Kontakt, wenn es sowieso schon kälter ist.

Differentielle Erwärmung treibt auch den Land-Seewind an, denn die schnellere Erwärmung des Landes am Tage hält auch dann noch an, wenn das Land sowieso schon wärmer ist als das Meer, und auch die nächtlichen Abkühlung dauert an, wenn es bereits kälter geworden ist als das Meer. *Am Tage* verhält sich also das kalte Meer wie der Nordpol, das warme Land wie der Äquator.

Im Analogieschluss würde man eine Absinkbewegung am Nordpol und ein Aufsteigen am Äquator erwarten, mit entsprechenden Horizontalwinden zur Schließung einer hemisphärischen meridionalen Zirkulation. Die Analogie zum Seewind wäre eine meridionale Bodenströmung vom Pol zum Äquator. Auf der Südhalbkugel hätte man eine spiegelbildliche Zirkulation. Wenn sich die Erde nicht drehen würde, fände diese Zirkulation auch tatsächlich statt! Obwohl dieses Bild der globalen Zirkulationen für die rotierende Erde noch modifiziert werden muss, zeigt sich im Prinzip schon die Ordnung, von der die Rede war, die Ordnung, die die Strahlungs-Randbedingung den vielen Freiheitsgraden aufprägt. Daher schauen wir uns diese Superzellen einmal genauer an:

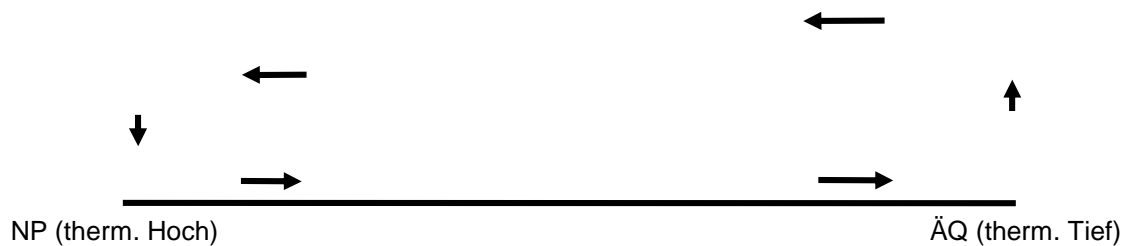


Wir erwarten zunächst ein Aufsteigen der äquatorial erwärmten Luft, einen Luftausstoß in der Höhe und ein meridionales Abfließen der Höhenluft. Da die Höhenluft abfließt, verringert sich das Gewicht von gedachten äquatorialen Luftsäulen, und der Bodendruck fällt. Es bildet sich ein äquatoriales thermisches Tief.

Die Verkürzung der polar abgekühlten Luftsäulen verursacht ein Ansaugen der dort sowieso schon ankommenden Höhenluft, und der Bodendruck steigt. Es bilden sich die thermischen polaren Hochs und die polaren Absinkgebiete. Was noch fehlt, ist der bodennahe Rückfluss zum warmen Äquator, also das Analogon des Seewindes hin zum erwärmten Land. Dieser Bodenwind kann natürlich auch als Druckausgleichströmung vom hohen zum tiefen Druck verstanden werden. Die Wärmekraftmaschine „nicht rotierende Atmosphäre“ treibt zwar keine Autoräder an, aber immerhin zwei hemisphärischen Zirkulationsräder. Wenn wie hier kalte, also schwere Luft absinkt und dafür warme, also leichte Luft aufsteigt, fällt insgesamt der Schwerpunkt des Systems. Eine solche Zirkulationszelle läuft „von allein“, ebenso wie ein Golfball „von allein“ den niedrigsten erreichbaren Schwerpunkt im Gelände aufsucht. Von allein laufende Zellen heißen Hadleyzellen oder auch „thermisch direkte“ Zellen.

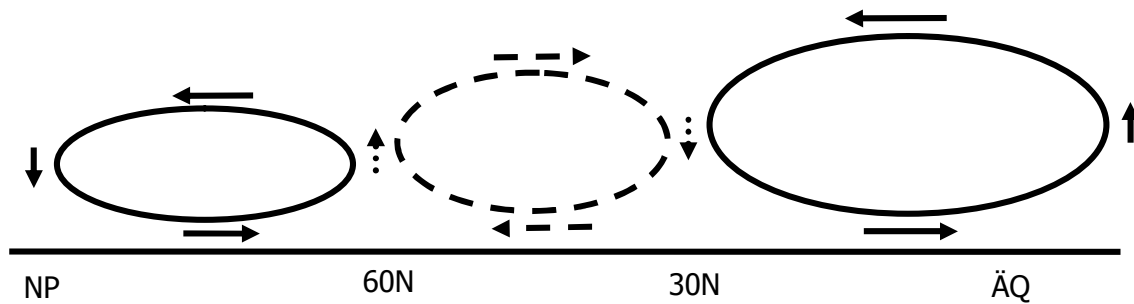
## 11. Modifikationen durch die Erdrotation

Auf der rotierenden Erde wird diese Zirkulation allerdings durch die Corioliskraft verhindert. - In der folgenden Skizze führen wir die erforderlichen Modifikationen durch. Wir zeichnen aber nicht mehr die Zirkulationen zwischen den Polen, sondern nur noch den nordhemisphärischen Bereich, m.a.W., wir zeigen nur noch die linke Hälfte des obigen Bildes, die dort nur *eine* Zelle umfasst! Die Südhalbkugel verhält sich dann spiegelsymmetrisch!



Wie hier angedeutet, wird am Äquator eine größere Höhe erreicht als am Pol. Wie zuvor zeigen die thermischen Druckgebilde die beschriebene Pumpenwirkung. Aber diesmal schließt sich die Zirkulation nicht zu einer einzigen hemisphärischen Superzelle, so suggestiv das Bild dafür auch ist. Die auf der rotierenden Erde auftretende Corioliskraft verhindert das. Die vom Äquator polwärts ausgestoßenen *oberen* Luftmassen werden von der Corioliskraft mehr und mehr nach rechts abgelenkt, aus unserer Perspektive also von uns weg. Aus dem ursprünglichen Südwind wird immer mehr ein Westwind, und bei 30N haben wir einen *reinen* Westwind. Auf dem Weg rund herum um den 30. Breitenkreis findet sich kein thermisches Hoch mehr, das die Luft wieder heruntersaugen würde, wie das bei der hemisphärischen meridionalen Superzelle über alle Breitenkreise hinweg noch der Fall war.

Die äquatoriale Wärmekraftmaschine pumpt aber weiterhin immer mehr Luft zum 30. Breitenkreis, die Luftmassen sammeln sich hier oben an, und so muss auch ohne thermische Ursache der Bodendruck zunehmen. Es entsteht ein dynamisches Hoch, der sogenannte subtropische Hochdruckgürtel. Aufgrund des ständigen Luftnachschiebs in der Höhe müssen die Luftmassen schließlich nach unten ausweichen. Das zeigt der gepunktete Pfeil in der nachfolgenden Skizze bei 30 N. Die so nach unten gepumpte Luft fließt wieder zum Äquator zurück, angezogen von der dortigen thermischen Boden - Ansaugwirkung. Der dynamische Hochdruckgürtel ist auch als Rossbreitenhoch bekannt. Bei jeder Abwärtsbewegung lösen sich Wolken auf, und daher liegen in diesem Klimagürtel die großen Wüsten der Erde, und spiegelbildlich auch in der Nähe von 30 S. - Die Coriolisablenkung nach rechts macht aus dem bodennahen Rückfluss den berühmten Nordostpassat.



Mangels Deckung des oberen Luftbedarfs schafft sich das polare thermische Hoch ebenfalls einen dynamischen Druckpartner, das subpolare Tief bei 60 N. Da die äquatoriale Höhenluft nicht mehr am Nordpol ankommt, muss sich das dortige thermische Hoch schließlich etwas anderes „einfallen lassen“. Es saugt die Luft wieder nach oben, die es unten selbst ausgestoßen hat. So entstehen insgesamt statt einer hemisphärischen Superzelle zwei kleinere Zirkulationsräder, die in der Skizze geschlossen durchgezeichneten Ellipsen. In beiden wird noch immer relativ wärmere Luft gehoben und relativ kältere Luft gesenkt, was in der Summe wieder eine Senkung des Schwerpunktes ergibt. Es entstehen zwei thermisch direkt angetriebene Hadleyzellen. Beide Zellen laufen immer noch „von allein“. - Was passiert aber in den Breiten zwischen 30 und 60 N, also in den mittleren Breiten, auch gemäßigte Breiten genannt, in denen wir leben?

Hier existiert eine thermisch *indirekte* Meridionalzirkulation, die sogenannte Ferrelzelle, in der Skizze gestrichelt gezeichnet. Die Ferrelzelle ist thermisch indirekt, weil sie dynamisch angetrieben wird von den gepunktet gezeichneten Vertikalbewegungen, die erst ihrerseits thermisch angetrieben werden von den thermisch erzwungenen Vertikalgeschwindigkeit an Pol und Äquator. Offenbar hebt diese Ferrelzelle relativ kältere Luft und senkt relativ wärmere Luft, was in der Summe auf ein *Anheben* des Schwerpunktes hinausläuft. Da aber auch ein Golfball nicht von allein auf einem Hügel rollt, verrichtet die Ferrelzelle keine Arbeit. Vielmehr muss an ihr Arbeit verrichtet werden. Sie ist keine Wärmekraftmaschine, sondern eine Wärmepumpe. Beispiele für Wärmepumpen sind Kühlschränke. Die Ferrelzelle ist ein „Verbraucher“ der angrenzenden Hadley- Wärmekraftmaschinen, genau so, wie auch Kühlschränke von „echten“ Motoren angetrieben werden müssen!

## 12. Zur Wechselhaftigkeit des Wetters in den mittleren Breiten

Zum Schluss machen wir uns Gedanken darüber, wieso in 30N immer die Sonne scheint, wieso man südlich davon fast immer sicher sein kann, dass der Wind als stetiger Passat aus Nordost kommt, und wieso sich in unseren mittleren Breiten Sonnenschein und Wolken so launisch abwechseln, wieso der Wind hier ständig seine Richtungen ändert, usw. Wo bleibt hier die ordnende Wirkung der Randbedingungen?

Wir fragen also nach dem physikalischen Grund für die Wechselhaftigkeit des Wetters in den gemäßigten Breiten. Er liegt hauptsächlich darin, dass die ordnenden thermischen Antriebe nur noch *indirekt* Einfluss nehmen können, indem sie erst einmal dynamische Vertikalwinde erzeugen und *diese* erst als Randbedingung den mittleren Breiten zur Verfügung stellen. Dynamische Randbedingungen sind aber von vornherein schon wechselhafter als thermische Randbedingungen. Wenn z.B. die Temperatur um 10 Grad schwankt, dann sind das nur etwa  $3 \frac{1}{2} \%$  des Mittelwertes von 288 Grad K. Dagegen haben Windschwankungen etwa die gleiche Größenordnung wie der Wind selbst. - Das gilt vielleicht nicht in *dem* Maße für die Vertikalgeschwindigkeiten in 30 und 60N. Dennoch kann man sagen:

Die Zwangsbedingung der differentiellen Erwärmung ist in den mittleren Breiten weniger ordnend als in den äquatorialen und polaren Breiten. Daher haben die am Anfang skizzierten, sich sehr komplex verhaltenden Freiheitsgrade der Atmosphäre in den mittleren Breiten mehr Möglichkeiten, sich frei zu entfalten! Daher ist die (nicht ohne Grund *gestrichelt gezeichnete*) Ferrelzelle keine permanent existierende Zirkulation, sie bildet sich erst nach einer langzeitlichen Mittelung langsam heraus, sozusagen mathematisch, nach einer Mittelung über die hier vorherrschenden vielfältigen und ständig variierenden nichtlinearen Bewegungsmuster.

Wenn man sich beliebige atmosphärische Zustände in den mittleren Breiten anschaut, so wird man die Ferrelzelle nie sehen. Die bei uns so ausgeprägte „Wechselhaftigkeit des Wetters“ kann also verstanden werden als ein Abbild der *grundsätzlichen* Prozess- und Bewegungsvielfalt komplexer Systeme, eine Vielfalt, die wie besprochen durch das Zusammenspiel von Vernetzung und Nichtlinearität zustande kommt, und die von den äußeren Zwangsbedingungen in unseren Breiten *weniger stark* eingeschränkt wird als in tropischen und polaren Breiten, eine Vielfalt, deren physikalische Hintergründe Ihnen nahe zu bringen mir ein Anliegen war.