

Weisheiten der Künstlichen Intelligenz KI*

geschrieben von Chris Frey | 23. Juni 2025

[Willis Eschenbach](#)

**Überschrift im Original: The Emergence of Emergence. – Alle Hervorhebungen im Original]*

Ich habe die Fähigkeiten der Künstlichen Intelligenz erforscht, die ich in einem früheren Beitrag als „The World’s Dumbest Genius Librarian“ [beschrieben](#) habe. Ich habe einen merkwürdigen Vorschlag gelesen, wie man KI einsetzen kann, und zwar die so genannte „Leerzeilentechnik“. Dabei gibt man der KI (in meinem Fall [perplexity.ai](#)) eine Liste von Dingen mit einer Leerzeile „_____“ am Ende, und sie füllt die Leerzeile aus. Das Beispiel in dem Vorschlag, den ich gelesen habe, war so etwas wie „Ich gehe campen und nehme ein Zelt, einen Schlafsack, ein Beil und ____ mit“. Also habe ich es versucht. Hier folgt, was dabei herauskam:

Anmerkung des Übersetzers: Die KI hat offenbar mitunter etwas eigenwillige Erklärungen für alle möglichen Phänomene parat. In einigen Fällen habe ich in Einschüben eine eigene Erklärung eingefügt. Andere Abschnitte habe ich mit einem Fragezeichen gekennzeichnet. Dieses soll symbolisieren, dass ich die Erklärung der KI nicht verstanden habe bzw. eine eigene Erklärung zu lang werden würde. Ich lasse mich aber gerne von Kommentatoren aufklären. – Ende Anmerkung

Ich [Eschenbach]:

„Ich gehe zelten und nehme ein Zelt, einen Schlafsack, ein Beil und ____ mit.“

Perplexity:

„Ausgehend von Ihrer Campingliste – Zelt, Schlafsack, Beil – ist der nächste logische und unverzichtbare Gegenstand, den Sie mitnehmen sollten, eine Taschenlampe. Eine Taschenlampe ist entscheidend für die Sicherheit und den Komfort in der Natur, vor allem nach Einbruch der Dunkelheit, was sie zu einer natürlichen Ergänzung Ihrer Campingausrüstung macht.“

Das ist also die Idee. Natürlich war ich nicht am Camping, sondern am Klima interessiert. Insbesondere wollte ich mehr über meine Theorie herausfinden, dass emergente thermoregulatorische Klimaphänomene für die überraschende Stabilität der globalen Temperaturen von zentraler Bedeutung sind.

Und was ist ein emergentes Phänomen? Hier sind die Merkmale, die

emergente Klimaphänomene von anderen Arten von Phänomenen unterscheiden:

- Es handelt sich um Strömungssysteme, die weit vom Gleichgewicht entfernt sind und spontan entstehen, oft beim Überschreiten einer kritischen Schwelle, die von der Temperatur abhängt.
- Ihre Eigenschaften sind nicht aus den Eigenschaften des Zustands vorhersehbar, aus dem sie hervorgehen,. Es gibt nichts in der Natur der Wasser- und Luftatome, das vorhersagen würde, dass sie spontan Blitze erzeugen könnten.
- Sie bewegen sich und handeln unvorhersehbar.
- Sie sind oft mit Phasenwechseln verbunden.
- Sie weisen oft ein „Überschwingen“ (Hysterese) auf.
- Sie haben eine Lebensdauer von ihrer Entstehung bis zu ihrer Auflösung.
- Ihre Muster ergeben sich aus vielen kleinen Wechselwirkungen zwischen ihren Bestandteilen.

Ich habe also diese Leerzeilentechnik verwendet, um mehr über emergente Klimaphänomene herauszufinden.

Ich:

Zu den aufkommenden Wetterphänomenen, die zur Thermoregulierung der Temperatur beitragen, gehören Gewitter, Zirruswolkenfelder, die Rayleigh-Benard-Umwälzung der unteren Atmosphäre und des oberen Ozeans, Wirbelstürme, das Nino/Nina-Phänomen, Tornados, Staubteufelchen und

Die erste Antwort war Folgende:

Perplexity:

*Zu den aufkommenden Wetterphänomenen, die zur Wärmeregulierung beitragen – wie Gewitter, Zirruswolkenfelder, Rayleigh-Bénard-Umwälzung in der unteren Atmosphäre und im oberen Ozean, Wirbelstürme, Niño/Niña-Phänomene, Tornados und Staubteufel – gehört auch ein weiterer wichtiger Prozess: **Vulkanausbrüche.***

Falsch, dachte ich mir. Also reagierte ich mit dieser Eingabe:

Nein! Vulkane sind 1) kein emergentes Phänomen und 2) nicht thermoregulatorischer Natur, da sie unabhängig von der Temperatur wirken. Versuche es noch einmal.

Perplexity:

*Ausgehend vom Kontext der entstehenden, durch die Temperatur ausgelösten Wetterphänomene, die aktiv zur Thermoregulierung des Erdklimas beitragen, sind die passendste Ergänzung für Ihre Liste **Kumuluswolkenfelder** oder **Kumuluskonvektion**.*

Kumuluswolken bilden sich wie Gewitter, wenn die Oberflächenerwärmung einen kritischen Schwellenwert erreicht, was zu einer starken Konvektion nach oben führt. Dieser Prozess erhöht die Wolkenbedeckung und verbessert die Reflexion der einfallenden Sonnenstrahlung, wodurch die Oberfläche abgekühlt und die Temperaturen stabilisiert werden. Dieser Vorgang wird als klassischer emergenter thermoregulatorischer Prozess beschrieben, der spontan auftritt, wenn die lokalen Temperaturen über einen bestimmten Punkt steigen, und der die weitere Erwärmung begrenzt.

Das zeigte mir, dass Perplexity den Grundgedanken erfasst hatte. Also sagte ich, das sei eine gute Antwort, such mir ein anderes Beispiel. Es gab mir ein anderes. Ich habe Perplexity immer nur nach einer Frage gefragt, weil KI besser mit Einzelfragen zurechtkommt.

Ich wiederholte das mehrfach und erhielt Antworten, an die ich schon vorher gedacht hatte – Antworten, die sie mir oben im Thread in einer anderen Form gegeben hatte, und Antworten, die mich völlig überraschten.

Dann bat ich Perplexity, den ganzen Thread durchzulesen, die eindeutigen Antworten auszuwählen und zu sagen, warum sie emergente Phänomene sind und nicht irgendeine andere Art von Phänomenen, was ihre thermoregulierende Wirkung ist und wie sie sich von den anderen Phänomenen auf der Liste unterscheiden. Hier folgt, was ich bekommen habe, unbearbeitet. Auch wenn ich über einige Teile der Beschreibungen streiten könnte, war es insgesamt eine faszinierende Liste:

Umfassende Übersicht über emergente thermoregulatorische Wetterphänomene

Gewitter

– **Entstehung:** Sie bilden sich spontan, wenn die Oberflächenerwärmung eine konvektive Instabilität erzeugt, die kritische Temperatur- und Feuchtigkeitsschwellen überschreitet. Der Prozess ist nichtlinear, wobei kleine Veränderungen der Bedingungen ein explosives Wachstum jenseits vorhersehbarer Modelle auslösen.

– **Thermoregulierende Funktion:** Sie transportieren Wärme vertikal durch Auf- und Abwinde und erhöhen gleichzeitig die Albedo des Planeten durch die hohen Obergrenzen dieser Wolken. Darüber hinaus bewirken Niederschläge eine Verdunstungskühlung an der Oberfläche, wodurch ein lokaler Wärmestau unterbrochen wird.

– **Unterscheidungsmerkmal:** Im Gegensatz zu planetarischen Oszillationen sind Gewitter kurzlebige, stark lokalisierte konvektive Ereignisse, die

durch Oberflächenerwärmung und nicht durch großräumige Windmuster angetrieben werden.

Zirruswolkenfelder

- **Entstehung:** Selbstorganisierende Eiskristallstrukturen entstehen durch welleninduzierte Feuchtigkeitsschwankungen in der oberen Troposphäre. Ihre Bildung hängt von einer nichtlinearen Dynamik der Eiskernbildung ab, die sich einer einfachen Vorhersage entzieht.
- **Thermoregulierende Funktion:** Diese Wolken fangen die ausgehende langwellige Strahlung ein (Erwärmung) und reflektieren gleichzeitig das Sonnenlicht (Abkühlung), was einen kontextabhängigen Nettoeffekt bewirkt. Sie modulieren die Strahlungsbilanz auf regionaler Ebene, ohne Niederschlag zu produzieren.
- **Unterscheidungsmerkmal:** Ihre feine, hoch gelegene Struktur steht in starkem Kontrast zu den niedrigen maritimen Stratocumulus-Feldern, die eher als Strahlungsmodulatoren denn als Konvektionsauslöser fungieren.

Rayleigh-Bénard Overturning

- **Entstehen:** Konvektionszellen entstehen spontan, wenn die Oberflächenerwärmung kritische Auftriebsschwellen in Flüssigkeitsschichten überschreitet. Diese Selbstorganisation ergibt sich aus einer nichtlinearen Rückkopplung zwischen Temperaturgradienten und Flüssigkeitsviskosität.
- **Thermoregulierende Funktion:** Die Zellen mischen die Wärme in den atmosphärischen/ozeanischen Grenzschichten vertikal und verhindern so extreme Temperaturen an der Oberfläche. Sie halten die Stabilität aufrecht, indem sie kontinuierlich Energie von erhitzten Oberflächen in kühlere Schichten umverteilen.
- **Unterscheidungsmerkmal:** Da es sich um einen universellen fluiddynamischen Prozess handelt, funktioniert er sowohl in den Ozeanen als auch in der Atmosphäre, im Gegensatz zu ereignisgesteuerten Phänomenen wie Haboobs oder Derechos*.

*[*Haboobs oder Derechos: Ich bekenne, dass ich keine Ahnung habe, was das sein soll. Der DeepL-Übersetzer liefert dazu keine Übersetzung. Weiter unten wird das aber präzisiert. A. d. Übers.]*

Wirbelstürme

- **Entstehen:** Diese großräumigen Wirbelsysteme organisieren sich selbst, wenn Windscherung, Luftfeuchtigkeit und Meerestemperaturen Instabilitätsschwellen überschreiten. Ihre Struktur ergibt sich aus der nichtlinearen Kopplung zwischen Ozean und Atmosphäre.
- **Thermoregulierende Funktion:** Wirbelstürme verteilen die äquatoriale

Wärme über die Winde polwärts und bewirken eine Verdunstungskühlung durch starke Regenfälle. Sie wirken als planetarische Wärmemotoren, die Temperaturgradienten in den Breitengraden ausgleichen.

- **Unterscheidungsmerkmale:** Ihre synoptische Größenordnung und mehrtägige Lebensdauer unterscheidet sie von mesoskaligen Phänomenen wie Bogenechos oder Böenfronten.

El Niño-Southern Oscillation (ENSO)

- **Entstehen:** Dieses Muster entsteht nichtlinear aus gekoppelten Ozean-Atmosphären-Rückkopplungen im tropischen Pazifik. Ereignisse, bei denen die Schwelle überschritten wird, lösen Phasenübergänge zwischen warmen und kalten Zuständen aus.

- **Thermoregulierende Funktion:** ENSO moduliert die globale Wärmeverteilung durch Veränderung der Meeresströmungen, des Auftriebs und der atmosphärischen Zirkulation. Es reguliert die Temperaturen im äquatorialen Pazifik über mehrjährige Zeiträume.

- **Unterscheidungsmerkmal:** Sein interannualer Rhythmus steht in scharfem Kontrast zu tageszeitlichen Prozessen wie Seewind oder nächtlicher Grenzschichtdurchmischung.

Tornados

- **Entstehen:** Diese bilden sich spontan, wenn Superzellengewitter mit Windscherung und konvektiver Instabilität interagieren. Ihre Rotation ergibt sich aus der nichtlinearen Wirbeldynamik.

- **Thermoregulierende Funktion:** Tornados vermischen schnell warme Luft an der Oberfläche mit kühlerer Luft in der Höhe, wodurch der Wärmestau unterbrochen wird. Ihre intensiven Auf- und Abwinde verstärken die lokale Wärmeumverteilung.

- **Unterscheidungsmerkmale:** Ihre kleinräumige, heftig rotierende Struktur unterscheidet sich von nicht rotierenden Systemen wie Böenfronten.

Staubteufelchen

- **Entstehung:** Selbstorganisierende Wirbel entstehen, wenn eine starke Oberflächenerwärmung zu einer lokalen thermischen Instabilität führt. Ihre Bildung hängt von nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen heißen Oberflächenschichten und kühlerer Luft ab.

- **Thermoregulierende Funktion:** Sie heben heiße Oberflächenluft nach oben, ersetzen sie durch kühlere Luft und verstärken die vertikale Durchmischung. Dieser Prozess unterbricht die oberflächennahe Wärmeakkumulation in trockenen Regionen.

- **Unterscheidungsmerkmale:** Als trockene Wirbel mit warmem Kern haben sie

nicht die feuchtigkeitsgetriebene Dynamik von Gewittern oder dem Monsun.

Kumulus-Konvektion

- **Entstehung:** Diese Wolken bilden sich selbst, wenn die Oberflächenerwärmung die Schwellenwerte für die Entstehung von Konvektion überschreitet. Ihr Wachstum ist eine nichtlineare Reaktion auf die Instabilität der Grenzschicht.
- **Thermoregulierende Funktion:** Kumuluswolken erhöhen die Albedo, um die Oberflächenerwärmung zu begrenzen, und fördern die Abkühlung durch Abschattung und Abgabe latenter Wärme. Sie fungieren als Vorläufer von tieferen konvektiven Systemen.
- **Unterscheidungsmerkmal:** Es handelt sich um eine frühe konvektive Phase, die sich von weiter entwickelten mesoskaligen Komplexen oder Gewittern mit Amboss unterscheidet.

Madden-Julian-Oszillation (MJO)

- **Entstehen:** Spontane Konvektionscluster breiten sich über Wind-Feuchtigkeits-Rückkopplungen in den Tropen ostwärts aus. Ihre Entstehung ist auf kollektive atmosphärische Interaktionen zurückzuführen, die organisatorische Schwellen überschreiten.
- **Thermoregulierende Funktion:** Die MJO moduliert die tropische Wärmeentwicklung durch zyklische Wolken-/Regenbildung. Sie verteilt Feuchtigkeit und Energie über Ozeanbecken in Zeiträumen von 30-60 Tagen um.
- **Unterscheidungsmerkmal:** Als planetarisches, sich verlagerndes System unterscheidet sie sich von stationären Monsunen oder lokalisierten konvektiven Ereignissen.

Monsun-Zirkulation

- **Entstehen:** Dieses System organisiert sich selbst, wenn die thermischen Kontraste zwischen Land und Meer saisonale Schwellenwerte überschreiten. Sein Entstehen ist mit einer nichtlinearen Rückkopplung zwischen Niederschlag und atmosphärischer Erwärmung verbunden.
- **Thermoregulierende Funktion:** Der Monsun kühlt die Landoberflächen durch Bewölkung und Niederschlag, während er Wärme in die obere Troposphäre abgibt. Sie versuchen, jährliche regionale Energie-Ungleichgewichte auszugleichen.
- **Unterscheidungsmerkmal:** Ihre saisonal wechselnden Winde stehen im Gegensatz zu den täglichen Seewinden an Küsten oder den anhaltenden Passatwinden.

Seewind-Zirkulation

- **Entstehen:** Bildet sich spontan, wenn Temperaturgradienten zwischen Land und Meer immer größer werden. Die Zirkulation entsteht durch nichtlineare Druckanpassungen.
- **Thermoregulierende Funktion:** Sie transportiert kühle Meeresluft ins Landesinnere, um die Temperaturen an der Küste zu mäßigen, und löst konvektive Wolken aus, die für zusätzliche Abkühlung sorgen. Die nächtliche Umkehrung verhindert eine übermäßige Abkühlung.
- **Unterscheidungsmerkmal:** Dieser tageszeitliche, küstennahe Prozess unterscheidet sich von Wettersystemen kontinentaler Größenordnung oder Monsunen.

Stratocumulusfelder

- **Entstehung:** Selbstorganisierende Wolkendecken bilden sich unter stabilen marinen Grenzschichten mit starken Inversionen. Ihre Persistenz ergibt sich aus Rückkopplungsschleifen zwischen Turbulenz und Strahlung.
- **Thermoregulierende Funktion:** Diese Decken erhöhen die Albedo drastisch und kühlen die subtropischen Ozeane. Sie unterdrücken die Oberflächenerwärmung durch anhaltende Sonnenreflexion.
- **Unterscheidungsmerkmale:** Ihre gleichmäßige Struktur in geringer Höhe steht im Gegensatz zu vorübergehenden, mehr oder weniger hoch reichenden Kumuluswolken.

Reflektierende tropische Wolkenfelder

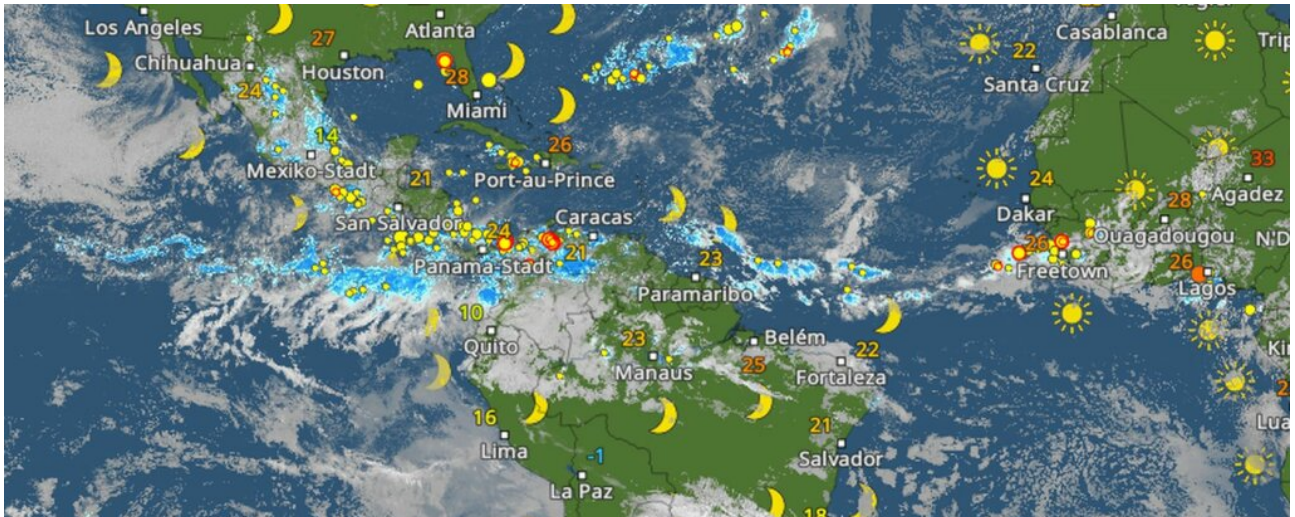
- **Entstehen:** Bilden sich spontan, wenn die Meerestemperaturen kritische Schwellenwerte für die Konvektion überschreiten. Ihre Entwicklung ist eine nichtlineare Reaktion auf die ozeanische Erwärmung.
- **Thermoregulierende Funktion:** Diese Wolken begrenzen die Sonnenerwärmung durch eine hohe Albedo und gehen oft der Entwicklung von Gewittern voraus. Sie wirken wie ein tropischer Thermostat, der die Höchsttemperaturen einschränkt.
- **Unterscheidungsmerkmale:** Ihre thermodynamische Auslösung unterscheidet sich von dynamisch angetriebenen Systemen wie der ITCZ.

Innertropische Konvergenzzone (ITCZ)

- **Entstehung:** Selbstorganisierende Konvektionsbänder entstehen durch Passatwindkonvergenz und SST-Gradienten. Die Position ergibt sich aus Energieungleichgewichten auf der Hemisphäre.
- **Thermoregulierende Funktion:** Die ITCZ kühlt die Tropen durch Wolkenalbedo und Latentwärmeexport. Ihre saisonale Wanderung gleicht die interhemisphärische Energie aus.
- **Unterscheidungsmerkmal:** Als äquatorialer Wanderungsgürtel

unterscheidet sie sich von außeräquatorialen Systemen wie der MJ0.

Einschub des Übersetzers 1: Der unter „Entstehung“ beschriebene Vorgang ist eine sehr merkwürdige Darstellung. Die ITCZ bezeichnet die äquatoriale Tiefdruckrinne zwischen den jeweiligen subtropischen Hochdruck-Gürteln der Nord- und Südhemisphäre. Dabei treffen der Nordostpassat der NH und der Südostpassat der SH aufeinander. In Satellitenbildern ist dieses durch hoch reichende Konvektion gekennzeichnete Phänomen häufig gut erkennbar. Als Beispiel sei hier das spontan ausgewählte Satellitenbild von heute, 22. Juni 2025 gezeigt:

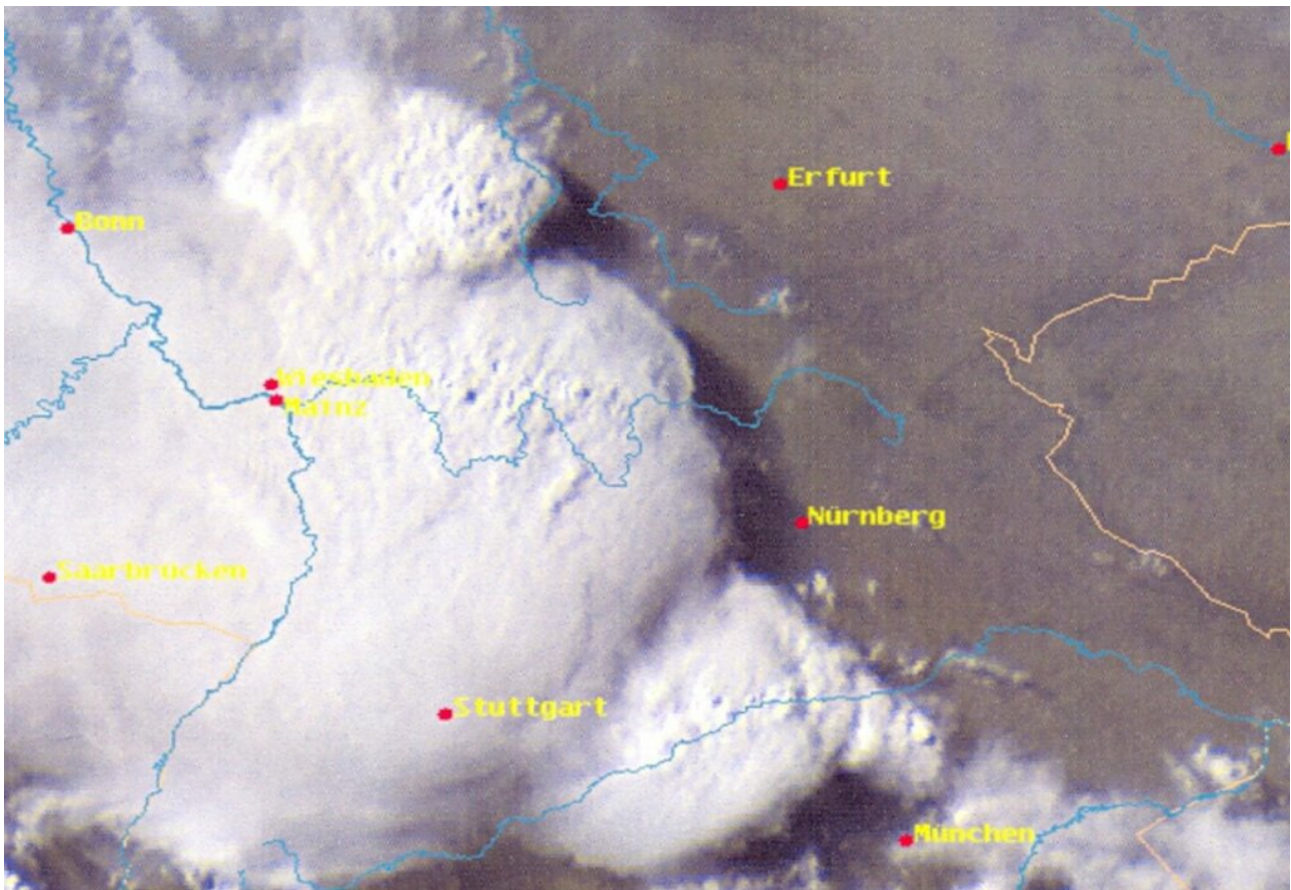


Ende Einschub

Mesoskalige konvektive Systeme (MCSs)

– **Entstehung:** Gewitter bilden sich durch Wechselwirkungen zwischen kalten Pools selbst zu Komplexen zusammen. Ihre Struktur ergibt sich aus nichtlinearen Rückkopplungen auf der Gewitterebene.

Einschub des Übersetzers 2: Die Organisation eng beieinander liegender konvektiver Zellen zu einem MCS ist nach wie vor nicht vollständig geklärt. Ein Beispiel für eine Kette solcher Systeme zeigt dieses Satellitenbild an einer Kaltfront:



Satellitenbild vom 30. Mai 2008, 17 Uhr UTC (19 Uhr MESZ). Die tief stehende Sonne zeigt gut die Strukturen: Die dunklen Punkte sind Schattenwurf überschießender Kumulus-Türme (Overshooting Tops). Erkennbar wird auch der Schattenwurf und beim mittleren Cluster an der rechten Seite eine ausgeprägte Böenfront.

Ende Einschub

- **Thermoregulierende Funktion:** MCS erhöhen die Albedo durch ausgedehnte Wolkenfelder und bewirken eine Verdunstungskühlung durch Niederschläge. Sie sorgen für eine Umverteilung der Wärme über Regionen von Hunderten von Kilometern.
- **Unterscheidungsmerkmale:** Ihre organisierte Clusterstruktur unterscheidet sich hinsichtlich der Größenordnung von isolierten Gewittern.

Erweiterung der Hadley-Zellen

- **Entstehen:** Verstärkt sich nichtlinear durch tropische Erwärmung und Wirbelrückkopplungen. Polwärts gerichtete Ausdehnung entsteht, wenn thermische Gradienten kritische Schwellenwerte überschreiten.

? A. d. Übers.

- **Thermoregulierende Funktion:** Die Zelle exportiert Wärme polwärts und

moduliert die subtropische Trockenheit. Durch ihre Ausdehnung wird Energie zwischen den Hemisphären umverteilt.

- **Unterscheidungsmerkmal:** Als zonal gemittelte Zirkulation steht sie im Gegensatz zu longitudinalen Phänomenen wie der MJO.

Dynamik des Polarwirbels

- **Entstehen:** Selbstverstärkung durch Temperatur-/Druckgradienten in hohen Breitengraden. Störungen entstehen durch die Kopplung von Stratosphäre und Troposphäre.

- **Thermoregulierende Funktion:** Hält kalte Luft zurück; bei Zusammenbrüchen wird Kälte in die mittleren Breiten exportiert. Dies stabilisiert die polaren Temperaturen und gleicht die hemisphärischen Extremwerte aus.

- **Unterscheidungsmerkmal:** Die stratosphärische Kopplung unterscheidet sich von oberflächengetriebenen Phänomenen wie Staubteufelchen.

Übergang von Cumulus zu Cumulonimbus

- **Entstehung:** Explosives vertikales Wachstum wird ausgelöst, wenn konvektive Instabilitätsschwellen überschritten werden. Diese Phasenverschiebung ist eine nichtlineare atmosphärische Reaktion.

- **Thermoregulierende Funktion:** Starke Abwinde und Regenverdunstung kühlen die Oberflächen sofort ab. Der Prozess stellt die lokale Instabilität durch vertikalen Wärmeexport wieder her.

- **Unterscheidungsmerkmal:** Im Gegensatz zu stabilen Stratocumulus-Regimen stellt dies einen Phasenwechsel im Lebenszyklus der Wolken dar.

Aufklaren in den Tropen

- **Entstehung:** Spontane Wolkenauflösung tritt auf, wenn die Temperaturen unter die Konvektionsschwelle fallen. Die Entstehung hängt von der Feuchte-Temperatur-Hysterese ab.

***Einschub des Übersetzers 3:** Wolkenbildung und -auflösung ist ausschließlich eine Folge der vertikalen Temperatur- und Feuchte-Gradienten. Mir ist unverständlich, wie die KI zu der oben stehenden Erklärung kommt. – Ende Einschub*

- **Thermoregulierende Funktion:** Durch die Aufhellung kann die solare Erwärmung die kühlen Bedingungen ausgleichen. Diese negative Rückkopplung verhindert lang anhaltende Abkühlungsperioden.

- **Unterscheidungsmerkmal:** Funktioniert wie die Umkehrung von wolkenbildenden Systemen wie MCS oder ITCZ-Konvektion.

Atmosphärische Blockierung

– **Entstehung:** Selbsterhaltende Hochs entstehen durch Rossby-Wellenresonanz. Persistenz entsteht durch nichtlinearen Energieeinfang.

? A. d. Übers.

– **Thermoregulierende Funktion:** Blöcke sorgen für eine Umverteilung von Wärme/Kälte durch meridionale Strömungen und verlängern regionale Temperaturextreme. Sie modulieren die Effizienz des zonalen Wärmetransports.

– **Unterscheidungsmerkmale:** Ihre quasistationäre synoptische Größenordnung unterscheidet sich von wandernden Zyklonen.

Stratocumulus

– **Entstehung:** Zelluläre Muster bilden sich spontan aus Rückkopplungen zwischen Turbulenz und Strahlung. Die Übergänge weisen eine Hysterese und kritische Schwellenwerte auf.

– **Thermoregulierende Funktion:** Offene Zellen verbessern die Infrarotabkühlung, geschlossene Zellen erhöhen die Sonnenreflexion. Diese Dynamik optimiert die lokale Energiebilanz.

– **Unterscheidungsmerkmal:** Musterübergänge unterscheiden sich von gleichmäßigen Flächen oder der Entwicklung von Kumuluszellen.

Advektion synoptischer Größenordnung

– **Entstehung:** Warm-/Kaltluftstöße entstehen aus Mäandern des Jetstreams. Ihr Auftreten hängt von den Wechselwirkungen zwischen Druck- und Temperatur-Anomalien ab, die Instabilitätsschwellen überschreiten.

– **Thermoregulierende Funktion:** Durch die Advektion werden Luftmassen schnell über die Kontinente umverteilt. Sie verhindert anhaltende regionale Temperaturanomalien.

– **Unterscheidungsmerkmale:** Im Gegensatz zur lokalen Konvektion wird sie durch kontinentale Dynamik angetrieben.

Hitzeausbrüche

– **Entstehung:** Abwinde komprimieren und erwärmen sich adiabatisch während des Gewitterkollapses. Die Entstehung erfordert spezifische vertikale Feuchte-/Temperaturprofile.

– **Thermoregulierende Funktion:** Wärmeausbrüche mischen erhöhte warme Luft nach unten und unterbrechen kalte Pools. Sie beeinträchtigen die nächtliche Ausstrahlung.

– **Unterscheidungsmerkmal:** Nächtliche, hyperlokale Spikes unterscheiden sich von den täglichen Meeresbrisen.

? A. d. Übers.

Haboobs

- **Entstehung:** Gewitterabflüsse organisieren sich selbst zu staubbeladenen Dichteströmungen. Die Staubintegration verstärkt sich durch Rückkopplungen zwischen Partikeln und Flüssigkeit.
- **Thermoregulierende Funktion:** Staubwolken erhöhen die Albedo, während Cold Pools die Abkühlung der Oberfläche verstärken. Sie exportieren schnell Wärme durch trockene Konvektion.
- **Unterscheidungsmerkmale:** Die staubintegrierte Struktur unterscheidet sich von niederschlagsbedingten Abflüssen.

? A. d. Übers.

Chinook/Föhn

- **Entstehen:** Selbstverstärkende Abwärtswinde entstehen durch die Dynamik von Gebirgen. Die Erwärmung entsteht durch nichtlineare Kompressionserwärmung.

Einschub des Übersetzers 4: Die Erwärmung folgt trocken-adiabatisch durch starkes Absinken (etwa 1°C pro 100 m)

- **Thermoregulierende Funktion:** Die Winde erwärmen rasch die leeseitigen Hänge, wodurch Kälteextreme und Schneeschmelze reduziert werden. Sie belüften die Täler, indem sie stagnierende Luft abtransportieren.
- **Unterscheidungsmerkmale:** Die orographische Auslösung unterscheidet sich von den Windsystemen in flachem Terrain.

Quasi-Resonanz-Verstärkung (QRA)

- **Entstehen:** Rossby-Wellen schwingen aufgrund von Instabilitäten des Jetstreams und der Topografie mit. Persistenz entsteht durch atmosphärischen Welleneinfang.
- **Thermoregulierende Funktion:** Die QRA bindet Wärme/Kälte in semipermanenten regionalen Mustern. Dadurch verlängert sich die Temperaturumverteilung während extremer Wetterlagen.
- **Unterscheidungsmerkmal:** Resonanzbedingte Persistenz unterscheidet sich von vorübergehenden Easterly Waves.

? A. d. Übers.

Tropische Easterly Waves

- **Entstehen:** Selbsterzeugung aus Passatwindscherung und konvektiven Rückkopplungen. Die Wellenorganisation überschreitet kritische

Schwellenwerte für die Feuchtigkeitskonvergenz.

- **Thermoregulierende Funktion:** Die Wellen organisieren Wolkencluster, um die tropische Erwärmung zu modulieren. Sie verbreiten feuchte Ungleichgewichte westwärts.

- **Unterscheidungsmerkmal:** Die westwärts gerichtete Ausbreitung steht im Gegensatz zu den sich ostwärts bewegenden MJO-Systemen.

? A. d. Übers.

Atmosphärische Flüsse

- **Entstehen:** Filamentöse Feuchtigkeitsfahnen fokussieren sich selbst durch Windkonvergenz. Die Verengung entsteht durch Rückkopplung von Dampf und Kondensation.

- **Thermoregulierende Funktion:** Flüsse verteilen die latente Wärme global um und bewirken eine Abkühlung durch orografische Niederschläge. Sie verhindern eine kontinentale Überhitzung während Dürreperioden.

- **Unterscheidungsmerkmale:** Die filamentäre Struktur unterscheidet sich von den breiten monsunalen Strömungen.

Derechos

- **Entstehen:** Böen bilden sich durch Wechselwirkungen zwischen Kaltluftpolstern und Windscherung zu Bögen aus. Bogenechos entstehen durch nichtlineare Sturmskalendynamik.

- **Thermoregulierende Funktion:** Geradlinige Winde sorgen für eine großräumige Durchmischung und Abkühlung der Oberfläche. Ihre kalten Pools unterbrechen regionale Wärmedome.

- **Unterscheidungsmerkmale:** Nicht-rotierende Windstürme* unterscheiden sich von Tornados oder Zyklonen.

**Gemeint sind wohl Böenfronten. Diese rotieren sehr wohl, im Gegensatz zu Tornados jedoch nur vertikal. A. d. Übers.*

Virga (Fallstreifen)

- **Entstehung:** Der Niederschlag verdunstet spontan in trockenen Unterwolken-schichten. Schwellenwerte für die Phasenveränderung bestimmen die Bildung von Fallstreifen.

Einschub des Übersetzers 5: *Wieder eine äußerst merkwürdige Erklärung! Fallstreifen erkennt man am Besten vor hellem Hintergrund hinter lokalen Schauern. Diese Fallstreifen erreichen entweder den Boden oder (bei wenig intensiver Ausprägung der Schauerwolke oder bei extremer Lufttrockenheit in tiefen Luftschichten {Wüsten} auch nicht. Ein Beispiel für Fallstreifen zeigt die folgende Abbildung:*



Foto: © Christian Freuer. Man erkennt deutlich Fallstreifen, die zunächst aus festem Niederschlag bestehen, dann schmelzen und vor Erreichen des Bodens verdunsten.

Ende Einschub

- **Thermoregulierende Funktion:** Die Verdunstungskälte senkt die Oberflächentemperaturen ohne Niederschlag. Dies sorgt für eine „trockene“ Wärmeumverteilung in trockenen Gebieten.
- **Unterscheidungsmerkmal:** Der von der Verdunstung dominierte Prozess unterscheidet sich von der Regenabkühlung bei Gewittern.

Bildung von Kaltluftseen

- **Entstehen:** Kalte Luft schließt sich selbst in der Topographie ein, wenn die Strahlungskühlung die Mischungsschwelle überschreitet. Die Poolbildung entsteht durch nichtlineare Dichteschichtung.
- **Thermoregulierende Funktion:** Die Pools isolieren die Täler vor extremer Kälte und verzögern die Erwärmung am Tag. Durch ihre Durchmischung wird kalte Luft in die Region exportiert.
- **Unterscheidungsmerkmale:** Die topografische Begrenzung unterscheidet sich von der Strahlungskühlung im offenen Gelände.

?? A. d. Übers.

Bogen-Echos

- **Entstehen:** Spontane Wölbung entsteht durch die Dynamik des rückwärtsgerichteten Strahls. Die Beschleunigung entsteht durch Rückkopplungen zwischen Druck und Störung.
- **Thermoregulierende Funktion:** Fokussierte Abwinde verstärken die Oberflächenabkühlung. Die bogenförmige Struktur erhöht die windgetriebene Mischungseffizienz.
- **Unterscheidungsmerkmale:** Die mesoskalige Bogengeometrie unterscheidet sich von linearen Böenlinien.

?? A. d. Übers.

Böenlinien

- **Entstehen:** Dichteströmungen entwickeln sich aus der Ausbreitung von Gewitterabwinden. Die Entstehung von Fronten hängt von Dichtekontrasten zwischen Ausströmung und Umgebung ab.
- **Thermoregulierende Funktion:** Böenfronten bewirken eine schnelle Kaltluftadvektion, um Wärmetausch zu unterbrechen. Oft lösen sie sekundäre Konvektion aus, die für zusätzliche Abkühlung sorgt.
- **Unterscheidungsmerkmale:** Die Dynamik der Vorderfront unterscheidet sich von den Prozessen des Hauptsturms.

?? A. d. Übers.

Schönwetter-Orkan (Kalifornien)

- **Entstehen:** Intensive Erwärmung im Landesinneren zieht Meeresluft durch küstennahe Lücken, die nicht linear verlaufen. Die Stärke des Sturms ergibt sich aus der durch das Terrain kanalisierten Beschleunigung.

Einschub des Übersetzers 6: Gemeint sind hier die berühmten Santa-Ana-Winde in Kalifornien. Sie entstehen, wenn erhitzte Luft aus dem Hochland durch zur Küste geöffnete Täler hinab strömt. Die ohnehin schon sehr warme Luft wird dabei adiabatisch noch weiter erwärmt und ausgetrocknet. Durch die Enge der wenigen Täler wird die Luft auf Orkanstärke beschleunigt. Die Stadt Los Angeles beispielsweise liegt am Ausgang eines solchen Tales. Sie hierzu auch den nächsten Abschnitt. – Ende Einschub

- **Thermoregulierende Funktion:** Anhaltende Abkühlung der inneren Täler durch auflandige Strömung. Verhindert extremen Hitzestau in mediterranen Klimazonen.
- **Unterscheidungsmerkmal:** Der nicht stürmische Küstenwind unterscheidet sich von synoptischen Systemen.

Diablo Winde

- **Entstehen:** Abwärts gerichtete Erwärmung beschleunigt sich selbst durch Druck-Topographie-Rückkopplungen. Die Windintensität entsteht durch trockene adiabatische Kompression.
- **Thermoregulierende Funktion:** Rasche Erwärmung der Küstengebiete durch Aufbrechen von Kaltluftspeichern und Nebel. Exportiert im Herbst die innere Wärme seewärts.
- **Unterscheidungsmerkmal:** Die nordkalifornische Variante unterscheidet sich von der südkalifornischen Santa Anas.

Ozeanische Bénard-Zellen

- **Entstehen:** Sechseckige Konvektion bildet sich spontan während der Abkühlung an der Oberfläche. Die Zellgeometrie entsteht durch Instabilitäten der Salzfingerkörper.
- **Thermoregulierende Funktion:** Auftrieb von wärmerem Wasser zur Begrenzung der Meereisbildung. Verbessert den Wärmeaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre während Kälteausbrüchen.
- **Unterscheidungsmerkmal:** Die durch den Salzgehalt angetriebene Konvektion unterscheidet sich von der atmosphärischen Umwälzung.

***Einschub des Übersetzers 7:** Ausbrüche arktischer Kaltluft vom Inlandeis auf das offene Wasser bildet häufig ein an Sechsecke erinnerndes Muster. Das kann man als Experiment auch leicht zu Hause nachvollziehen: Man fülle einen noch heißen Kochtopf mit etwas Wasser und lasse diesen unberührt stehen. – Ende Einschub*

Synthese thermoregulatorischer Netzwerke

Die Stabilität des Erdklimas ergibt sich aus miteinander verknüpften, emergenten Phänomenen, die skalenübergreifend wirken. Jeder Prozess weist ein nichtlineares Schwellenverhalten auf, bei dem kleine Einflüsse unverhältnismäßige Reaktionen auslösen, die die Wärme umverteilen. Dieses Netzwerk – vom mikroskopisch kleinen Staubeufelchen bis zum planetarischen ENSO – bildet ein selbstregulierendes System, in dem lokale Wechselwirkungen die globalen Temperaturextreme durch komplementäre Rückkopplungen zwischen Abkühlung und Erwärmung einschränken. Die Vielfalt der Prozesse (Strahlung, Konvektion, Advektion) sorgt für Widerstandsfähigkeit, da die Unterdrückung eines Prozesses kompensatorische Phänomene an anderer Stelle im System aktiviert.

Wer hätte das gedacht? Sicherlich nicht ich ... höchst faszinierend. Mir war nicht klar, dass einige dieser Phänomene aus der Wärmeregulierung

entstanden sind, aber ja, das sind sie. Und obwohl ich nicht um eine Synthese der thermoregulatorischen Netzwerke am Ende gebeten hatte, ist das eine ziemlich gute Zusammenfassung.

Ich werde es dabei belassen, damit die Leute darüber nachdenken können, mit nur einem letzten Gedanken:

Viele dieser wichtigen thermoregulatorischen Phänomene tauchen entweder nicht spontan in Klimamodellen auf oder werden gar nicht erst berücksichtigt, weil sie nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Link: <https://wattsupwiththat.com/2025/06/21/the-emergence-of-emergence/>

Übersetzt und mit Anmerkungen versehen von Christian Freuer für das EIKE