Jacques Ambühl
Grosswiesenstrasse 167
CH-8051 Zürich
6. September 2016

Neuronale Netze in der Meteorologie, ein Beispiel

Mit *bionisch* bezeichnet man den Denkansatz eines Ingenieurs, der sich von der lebendigen Natur inspirieren lässt, wenn er eine Maschine oder eine technische Anlage plant und realisiert. Leonardo da Vinci beobachtet die Fledermäuse, als er sich seine Fluggeräte vorstellt; die ersten Flugzeugkonstrukteure versuchen den Flügelschlag der Vögel nachzuahmen. Zahlreiche moderne mechanische und architektonische Konstruktionen sind von Motiven aus der Planzen- sowie der Tierwelt inspiriert.
Wie verhält es sich bei den Strukturen des Hirns? Diese wurden allmählich im Laufe des 20. Jahrhunderts offen gelegt und die ersten Modelle von neuronalen Netzen, welche durch diese Entdeckungen angeregt wurden, entstanden in den 50er Jahren als Folge der Erfindung des Computers. Die Anwendungen von neuronalen Netzen in der Meteorologie sind indes selten geblieben; das Ziel dieses Aufsatzes ist es, eine solche Anwendung vorzustellen, die routinemässig bei MeteoSchweiz eingesetzt wird.

Es ist gleich in aller Bescheidenheit vorauszuschicken, dass die Objekte, die in der Folge vorgestellt werden, unendlich viel einfacher sind als die biologischen Systeme von Nerven und Gehirn, welche man in der Natur vorfindet.

Neuronale Interpretation von numerischen Vorhersagen

In der modernen Wettervorhersage unterscheidet man zwischen drei Berechnungsphasen. Die erste bezieht sich auf die Assimilation von Daten aus den Beobachtungssystemen (meteorologische Bodenstationen, Radar, Schiffe, Flugzeuge, Satelliten, …) im Hinblick auf die Berechnung einer Vorhersage. Diese Rechenoperation, welche Gegenstand der zweiten Phase ist, wird auf Supercomputern durchgeführt und projiziert die assimilierte Information in die Zukunft. Die dritte Phase, die statistische Deutung (statistical Interpretation) bezieht sich auf die Interpretation der Vorhersagen, welche aus der zweiten Phase stammen. Das auf diesem dritten Niveau angewendete neuronale Netz, das in der Folge vorgestellt wird, dient dazu, relevante Muster auf dem Gebiet der Meteorologie zu identifizieren und einzuordnen, welche vom Vorhersagemodell geliefert werden. Es muss beispielsweise in der Lage sein, Wetterlagen, welche eine Föhnlage ankündigen, zu entdecken: Eine Fähigkeit, welche die

erfahrene Meteorologin mit Leichtigkeit aufbringt, welche aber mit klassischen Algorithmen schwierig zu programmieren ist. So wird das neuronale System dem numerischen Modell nachgeschaltet und in die operationelle Kette integriert, indem es in der Interpretation der Vorhersagen, die eben dieses Modell liefert, aktiv wird und dadurch die Meteorologin berät.

Neuronales Lernen

In seiner einfachsten Architektur (Abbildung 1), besteht das Netz aus einer quadratischen Anordnung von 12 x 12 Neuronen, wobei jedes Neuron mit einem Bündel von 200 Synapsen ausgerüstet ist, welche gleichzeitig Informationsfühler und analoge Speicherelemente sind. Die Synapsen werden von jedem Neuron auf die Scheitelpunkte eines Gitters von 10 x 10 Punkten auf einer Karte von ganz Zentraleuropa projiziert. Die gemessenen meteorologischen Daten auf jedem dieser Scheitelpunkte entsprechen einer Höhe des Luftdrucks von 500 Millibar (Geopotential 500 Hektopascal) und der Temperatur auf der Höhe von 850 HPa. Auf diese Weise registriert das Netz eine Wettersituation durch ein System von 12 x 12 x 2 x 10 x 10 = 28’800 Synapsen. In der Praxis werden diese Daten durch ein numerisches Vorhersagemodell als Zahlenmatrix geliefert. Das von MeteoSchweiz ausgeführte Netz, dessen toroidaler Gestalt komplexer ist, wird später in knapper Form beschrieben (Abbildung 4).

Da diese virtuelle Struktur offensichtlich nur im Speicher eines Computers existiert, stellt sich die Frage, wo sich nun deren bionische Eigenart versteckt. Sie besteht unter anderem in der Tatsache, dass sich das Netz wie ein dynamischer, integraler Speicher verhält, also holistisch, in dem die Information nicht mehr Bit für Bit gespeichert ist, wie das in einem Computerspeicher der Fall wäre, sondern über das ganze Netz verteilt. Eine weitere bionische Eigenschaft ist das Lernverhalten, welches das Netz an den Tag legen muss, um seine Aufgabe erfüllen zu können.
In dieser Lernphase wird das Netz mit einer langen Reihe von Beispielen typischer meteorologischer Situationen konfrontiert, die aus der Vergangenheit stammen. Die Speicherung besteht darin, die bei der Betrachtung jeder dieser Situationen gewonnene Information allmählich in die Synapsen der Gesamtheit der Neuronen im Netz zu implementieren. Diese Art von Lernen heisst ***kompetitiv und unüberwacht***. So wird dem Netz keine vorgefertigte Antwort präsentiert, es ist ganz einfach gezwungen, sich selber zu organisieren, indem es einem einfachen Schema gehorcht, durch das die Neuronen im Wettbewerb miteinander stehen im Bemühen, das Wesen der dargebotenen Muster zu begreifen. [1]

[1]Im Gegensatz dazu ist *das* ***überwachte Lernen*** ein anderer neuronaler Algorithmus, dessen biologisches Gegenstück vermehrt in den limbischen Regionen des Hirns auftritt. Er besteht darin, auf optimale Weise auf einen Stimulus zu reagieren, für den die Antwort bekannt ist. Die Reflexe basieren auf diesem Lerntypus. Die dazugehörigen Netze heissen „Perzeptronen", der mit ihnen einhergehende Lerntypus „Gradient Backpropagation (Rückführung) des Gradienten“.

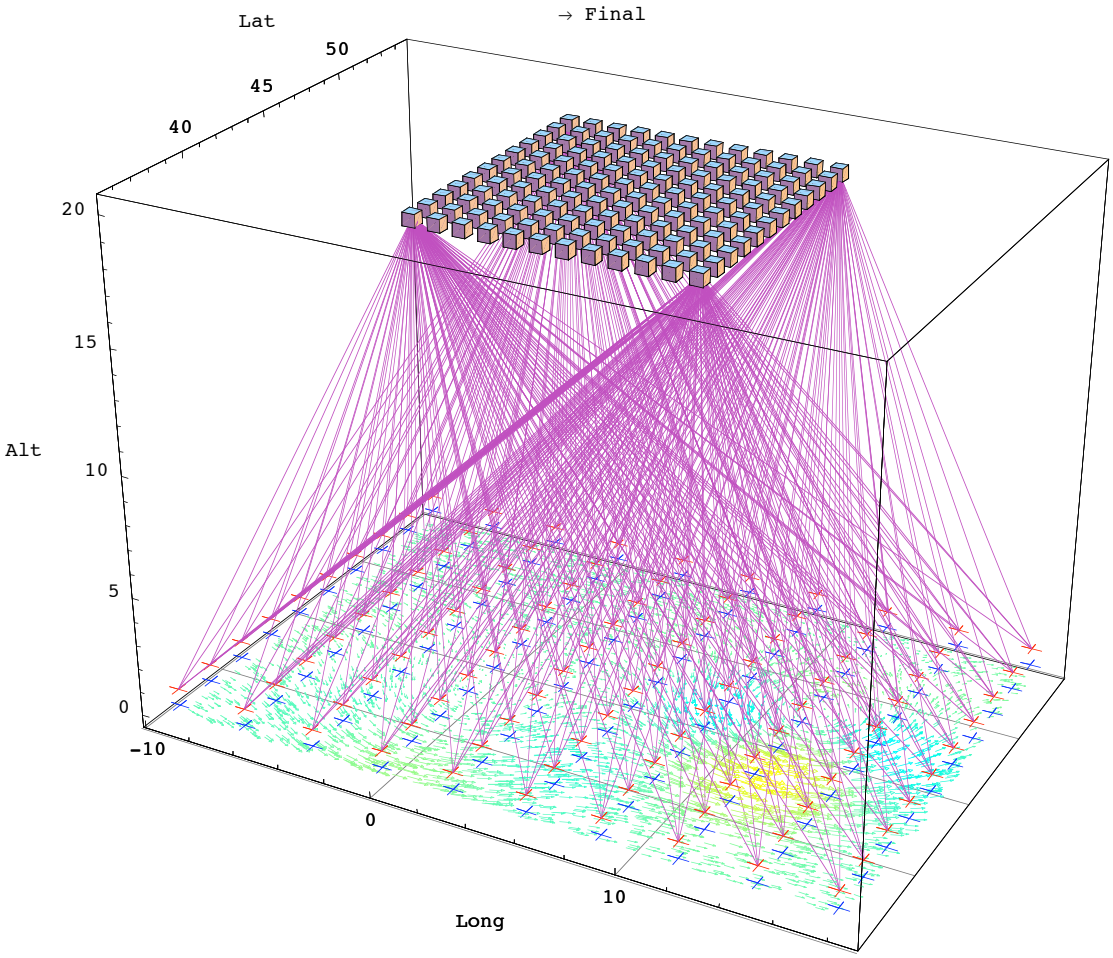

Abbildung 1. Schematische Darstellung des Netzes, in der jeder kleine Würfel ein Neuron symbolisiert. Seine Synapsen, gleichzeitig Sensoren und Speicherelemente, werden durch violette Linien angezeigt. Die Zeichnung „auf dem Boden" stellt eine Wetterkarte dar. In dieser Darstellung ist jedes Neuron mit 100 Positionen auf der Wetterkarte verbunden, wo die Temperatur auf 1500 m Höhe und der Luftdruck von 500 Millibar (Temperatur 850 hPa und Geopotential 500 hPa) gemessen werden. Hier werden nur 400 Verbindungen dargestellt, während in Wirklichkeit das Netz mit der Wetterkarte über 28'800 Synapsen verbunden ist.

Genauer gesagt: Bei jeder Präsentation einer neuen Wettersituation registriert das „siegreiche" Neuron aus der Gesamtheit der Neuronen dieses Muster, das heisst, dasjenige welches das Wesen des dargebotenen Musters am besten begreift. Es zwingt die benachbarten Neuronen, es ihm gleichzutun und verhindert weiter entfernte Neuronen, sich dem Muster anzunähern. Diese einfache Anordnung kann leicht programmiert werden. Das kompetitive unüberwachte Lernen wird regelmässig im Gehirn von Säugetieren angewendet, speziell in ihren Kortexregionen.

Nachdem diese Art von Lernen in den 60er Jahren klinisch beobachtet wurde, formalisierte es der finnische Ingenieur Teuvo Kohonen als Algorithmus in den 80er Jahren des vergangen Jahrhunderts. Ein pikantes Detail: Die Neurologen haben den Begriff der kortikalen Karte wieder aufgenommen, der ursprünglich von den Informatikern eingeführt wurde.

Am Ende der Lernphase hat sich das Netz mit einem Repertoire von typischen meteorologischen Situationen ausgestattet, die es gemäss ihrer Morphologie klassifiziert hat. Es hat ihren zyklonischen oder antizyklonischen Charakter erkannt, die Westwind-, die

Nordwind- und die Bisenlagen, und auch die Südströmungen, welche die Ausgangslage für Föhn in den Alpentälern und auf der Alpennordseite bilden. (Im Gegensatz dazu bewirken Nordströmungen eine Staulage am nördlichen Alpenrand, und, dank dem Nordföhn, heiteres Wetter im Süden). Jedem Neuron ist eine typische Situation zugeordnet; eine davon wird in der Abbildung 2 vorgestellt. Die Karte umfasst eine Zone von Portugal bis nach Polen, von 35 bis 55° nördlicher Breite, von 8° westlicher bis 18° östlicher Länge. Die Meeresküsten sowie die Landesgrenzen sind skizziert, die Schweiz befindet sich ein wenig rechts von der Mitte der Karte. Die entscheidende Eigenschaft dieser Abbildung aber liegt in der Tatsache, dass es sich hier nicht um eine meteorologische Karte handelt, sondern um die Karte der synaptischen Gewichte eines Neurons des Netzes, wie sie während der Lernphase ausgebildet wurde. Eine zweite Karte wird im Anhang gezeigt (Abbildungen 6 und 7).

Wenn man einem neuronalen Netz etwas Neues beibringen will, muss man schliesslich aus seinem Umfeld heraustreten, also zum Beispiel einschlafen, wie man es jeden Abend ohne weiteres selber beobachten kann.

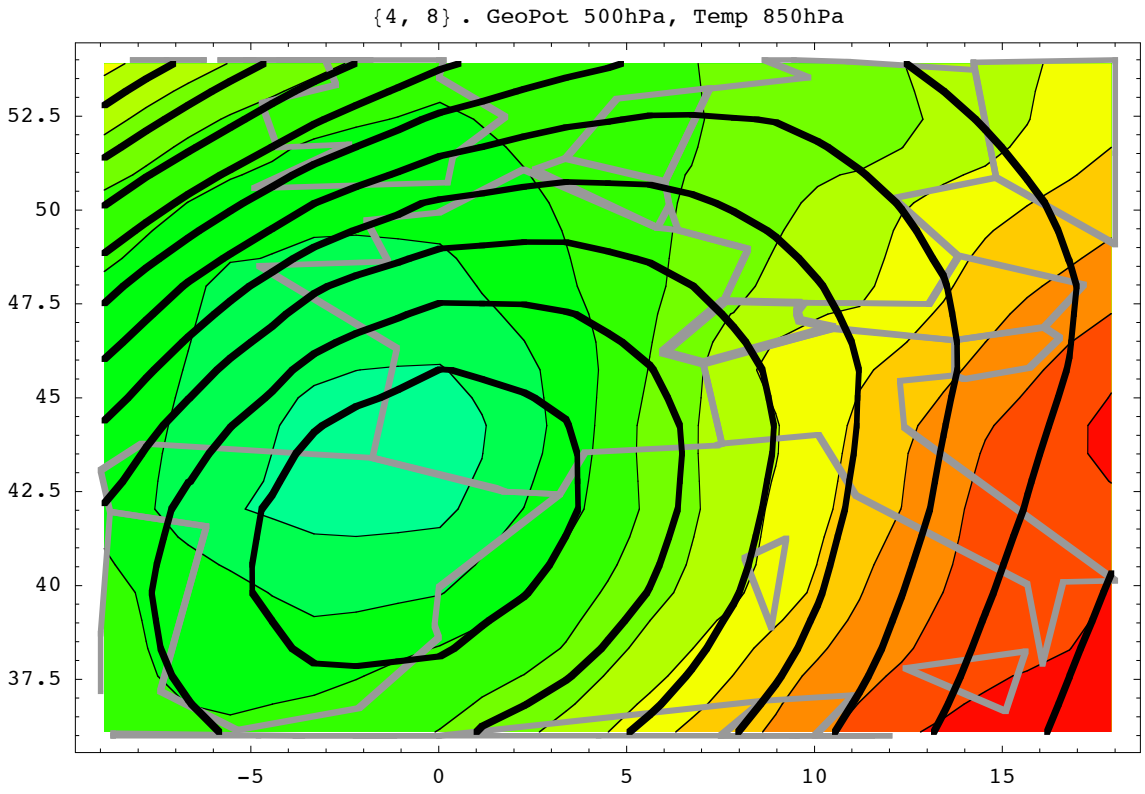

Abbildung 2. Auf diesem Neuron, klassiert {4,8} auf dem Netz (4. Linie, 8. Säule auf der Abbildung 1), wird die allgemeine Luftzirkulation über Europa einerseits durch die Höhenlinien von 500 hPa dargestellt und andererseits durch die Flächen der Temperaturverteilung, wobei blau und grün für die kalten Regionen stehen, gelb und rot für die warmen Regionen. Die Karte umfasst eine Zone, die von Portugal bis nach Polen reicht, die Meeresküsten und die Landesgrenzen sind skizziert, mit der Schweiz ein wenig rechts von der Mitte der Karte. Koordinaten sind die Breiten- und Längengrade. Man erkennt ein Tief über den Pyrenäen wie auch die allgemeine Südströmung über den Alpen, die für den Föhn charakteristisch ist.

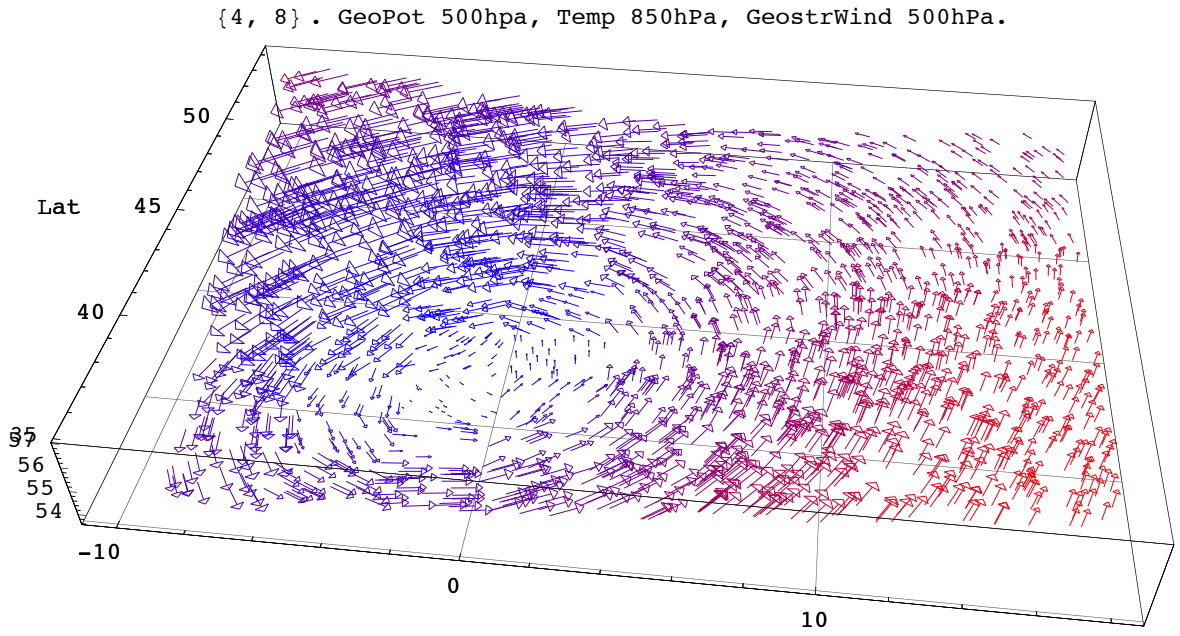

Abbildung 3. Synaptisches Feld des gleichen Neurons {4,8} in drei Dimensionen. Koordinaten sind die Breiten- und Längengrade. Die vertikale Achse stellt die geopotentielle Höhe des Druckfeldes von 500 hPa ausgedrückt in Hektometern dar. Das Windfeld ist so dargestellt, wie es vom Neuron erfasst wird. Man beobachtet wiederum die Position des Tiefs. Die Temperaturverteilung und das Druckniveau werden durch die Farbe und die Höhe der Pfeile an jedem Ort angegeben. Wieder besteht die grundlegende Eigenschaft dieser Darstellung in der Tatsache, dass es sich nicht um eine meteorologische Karte handelt, sondern um eine Beschreibung der Vorstellung, die sich das Netz von einer solchen Situation macht.

Toroidale Gestalt

Das Netz, das bei MeteoSchweiz eingesetzt wird, ist mit einer toroidale Topologie versehen. Es bildet eine geschlossene Oberfläche, die keine Kanten aufweist, wie in Abbildung 5 skizziert. Diese Topologie erlaubt es, den Lernprozess zu optimieren, indem sie eine gleichmässige Verteilung der Information auf die ganze Netzoberfläche fördert. Tatsächlich sind Neuronen, die wie in Abbildung 1 an den Ecken eines rechteckigen Netzes sitzen, im Lauf des Lernvorgangs durch die Tatsache, dass sie nur eine beschränkte Anzahl Nachbarn haben, benachteiligt.

In der künstlerischen Darstellung von Abbildung 4 erscheint das Netz „im Raum“. Eine Wettersituation, die ihm präsentiert wird, wird in der Nähe des Erdbodens gezeichnet, im Einklang mit den graphischen Konventionen der Abbildungen 3 und 7. Die kleinen Kugeln stellen die Neuronen dar, wobei jedes von ihnen gemäss der neuronalen Antwort des Neurons auf die vorgestellte Situation eingefärbt ist. Die Neuronen, die mit „rot“ antworten, haben eine Wettersituation gespeichert, welche der vorgestellten Situation unähnlich ist, während die Neuronen, die mit „grün“ antworten, ähnliche Situationen kodieren. Das siegreiche Neuron, hellgrün eingefärbt, ist dasjenige, dessen gespeicherte Situation der vorgestellten Situation am nächsten kommt. Es wird hier durch seine synaptischen Verbindungen mit der

meteorologischen Karte gekennzeichnet (wobei klar ist, dass jedes Neuron mit einem solchen Bündel ausgerüstet ist, die hier aber im Interesse einer übersichtlichen Zeichnung nicht dargestellt sind).

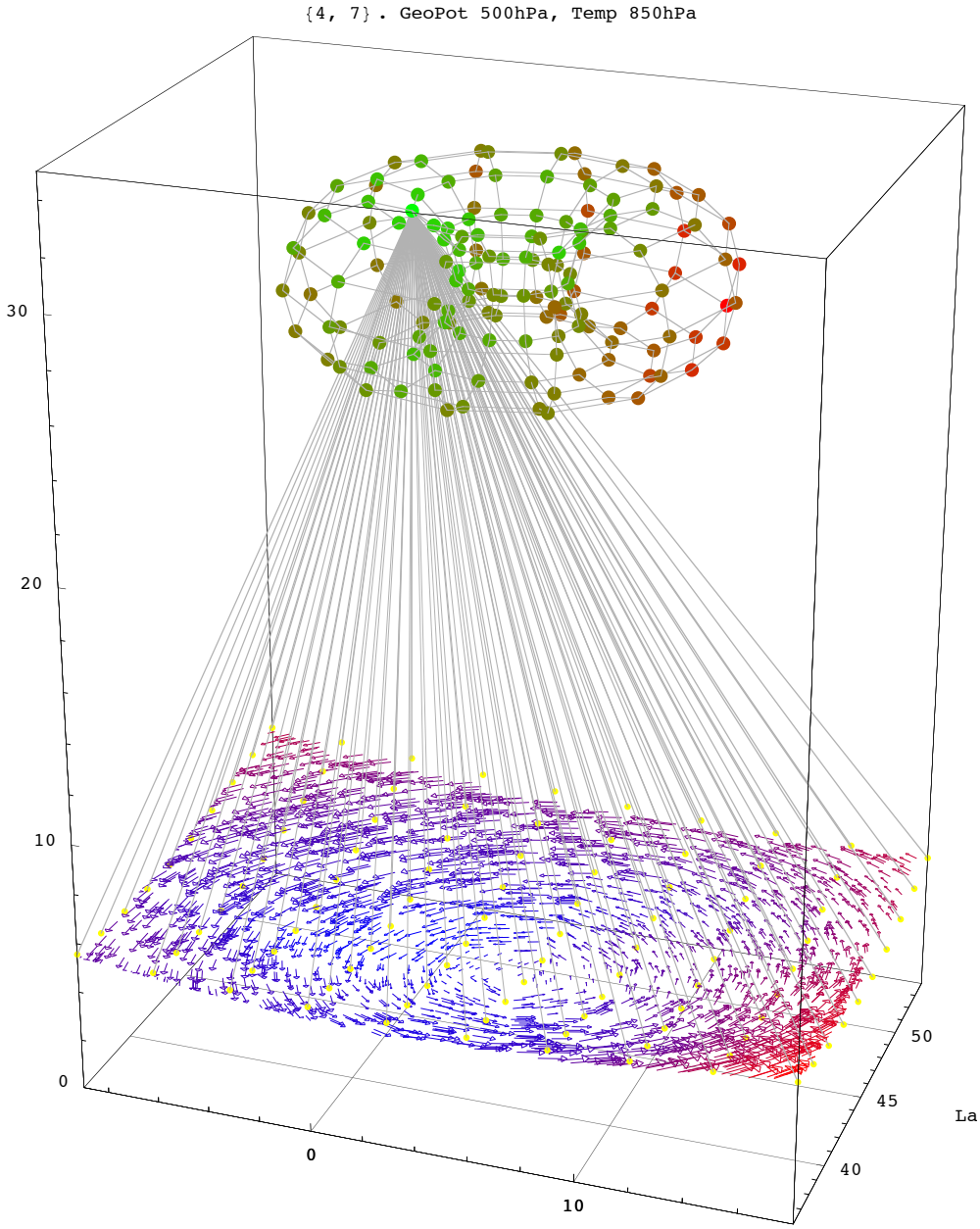

Abbildung 4. „Künstlerische" Darstellung eines toroidalen Netzes. Diese Abbildung muss mit der Abbildung 1 in Verbindung gebracht werden. Die gegenüberliegenden Kanten des Netzes in der Abbildung 1 wurden auf eine Weise „verklebt", die dem Netz sowohl ein geschlossene als auch ein randlose Topologie gibt, welche das Lernen fördert.

Eine Anwendung

Das oben beschriebene neuronale Netz wird von MeteoSchweiz verwendet, um die Szenarien, welche aus den Ensemble-Vorhersagen entstehen, zu klassifizieren. Diese Vorhersagen werden durch das europäische Vorhersagemodell ECMWF geliefert.

Halten wir uns kurz vor Augen, dass das Verfahren der Ensemble-Vorhersage es erlaubt, den chaotischen Charakter der atmosphärischen Strömungen einzubeziehen. Es besteht darin, nicht nur eine zeitliche Entwicklung des Wetters zu berechnen, sondern ein Ensemble von 50 möglichen Entwicklungen, die alle durch eine schwache Variation der Anfangsbedingung gekennzeichnet sind [Vgl. Ingenieurbiologie Nr. 4/2014. Pp. 18-22, Kassandras Dilemma]. Diese Anfangsbedingung wird dem Vorhersagemodell von den Beobachtungssystemen während der Assimilationsphase geliefert, die im Anfangskapitel angesprochen wird. Unsere Meteorologin wird also mit 50 Vorhersagen konfrontiert, das heisst mit 50 meteorologischen Karten, welche 50 mögliche Entwicklungen des Wetters beschreiben. Diese Alternativen zu klassifizieren, eine Prioritätenliste zu erstellen, ist eine fast übermenschliche Aufgabe, die für das neuronale Netz allerdings kein Problem bedeutet. So illustriert die Abbildung 5 eine schwache Föhnsituation, welche vom ECMWF am 25. Oktober für den Mittwoch, 28. Oktober 2015, um 12 Uhr UTC vorhergesagt wurde. Auf dieser Abbildung vermittelt die grosse obere Graphik den Mittelwert der 50 Vorhersagen des geopotentiellen Feldes, Höhenlinien 500 hPa, für diesen Mittwoch über dem nahen Atlantik und Europa. Man kann ganz klar die Rossby–Wellen erkennen, welche mit der allgemeinen planetarischen Zirkulation zusammenhängen (die beigen und braunen Schattierungen messen die Standardabweichung von diesem Feld und legen die Regionen offen, in denen die Vorhersage unsicher ist).
Die drei unteren Grafiken interessieren uns ganz besonders. Sie beschreiben die drei wahrscheinlichsten Szenarien der Wetterentwicklung für diesen Mittwoch, wie sie von dem Netz unterschieden werden. Die schwarzen Linien sind die Höhenlinien von 500 Hektopascal, sie stellen die Linien der atmosphärischen Strömung auf diesem Druckniveau dar, auf ungefähr 5500 Metern Höhe. Die blauen Flächen bezeichnen die kalten Luftmassen mit arktischem oder polarem Ursprung, die orangen und gelben Flächen stehen für die warmen Luftmassen mit sub-tropischer Herkunft. Interessant ist hier der Vergleich zwischen den drei Karten. Obwohl sie relativ ähnlich sind, unterschieden sie sich doch durch feine Nuancen, die man nur schwerlich von Auge erkennen könnte, wenn man die 50 Varianten der ursprünglichen Ensemble-Vorhersage vor sich hätte.
Genauer betrachtet beschreibt die Karte links oben die wahrscheinlichste Entwicklung für diesen Oktobermittwoch. Die Rubrik „Unit {2,10}, 26 members+OPR+CTR“ zeigt an, dass das Neuron {2,10} 26 Ensemble-Varianten erfasst hat, dazu die operationelle Integration und eine Kontrollrechnung. Die folgenden Neuronen in diesem Wettbewerb sind {2,9} mit 12 Varianten und {7,0} mit 11 Varianten. Die Bezeichnung „CL 9“, welche ‚Vorhersageklasse 9’ bedeutet, ist schliesslich ein Vertrauensmass, das man für diese Vorhersage für den Alpenraum geben kann, auf einer Skala von 0 bis 10. Dieser Index wird ausgehend von der Entropie der von dem gesamten Netz gelieferten Signal berechnet, gemäss einer Methode, die von der Thermodynamik inspiriert ist.

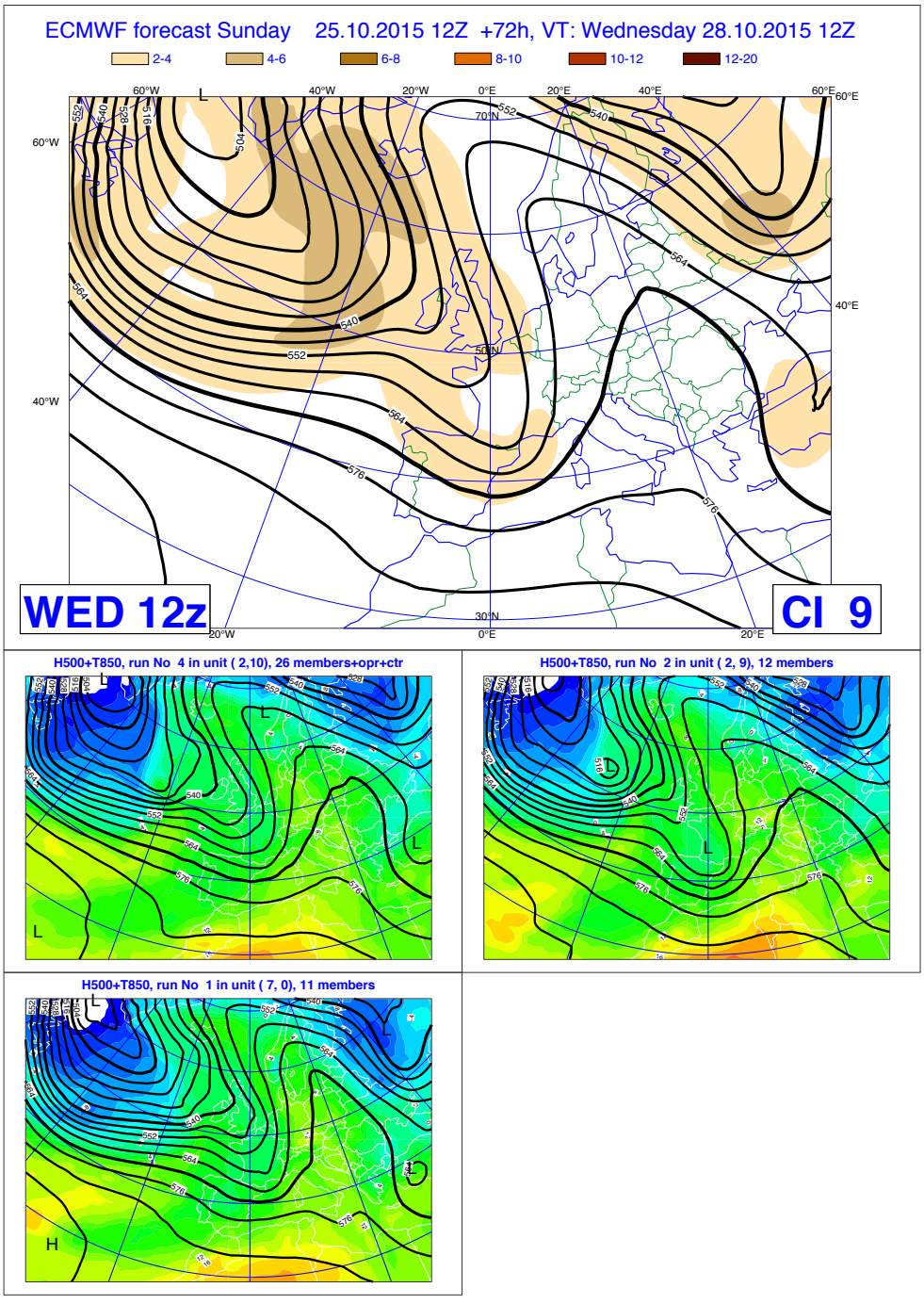

Abbildung 5. Obere Grafik: Ensemblevorhersage des ECMWF für Mittwoch, 28. Oktober 2015. Untere Grafiken: Interpretationen der drei alternativen Szenarien für eine schwache Föhnsituation über dem Alpenraum. Die schwarzen Höhenlinien beschreiben die Strömungslinien auf 500 Hektopascal, also auf ungefähr 5500 Metern Höhe. Die Temperaturen der Luftmassen sind farblich kodiert: blau für kalte (polare) Luftmassen, grün, gelb und orange für wärmere Luftmassen subtropischer Herkunft. Von diesen drei Karten präsentiert die Karte oben links, die durch das Neuron {2,10} kodiert ist, die wahrscheinlichste Wetterentwicklung für diesen Oktobermittwoch.

Folgerung

Was geschieht mit den Menschen, die mit solchen Systemen konfrontiert werden? Während in den Wetterdiensten der Vergangenheit die Meteorologen in der Produktionskette der Wetterinformation arbeiteten, sind sie von jetzt an oft oberhalb dieser Kette platziert und überwachen diese. Ein ähnlicher Übergang fand in der antiken Schifffahrt statt: Auf einer Galeere wurde der Antrieb durch die Ruderer geleistet. Auf den Segelschiffen hingegen takeln die Seeleute die Segel auf und der Wind treibt ihr Schiff voran. Auf unser Thema übertragen, wo die intelligente Arbeit, und nicht die Kraft von den Maschinen übernommen wird, löst diese Verschiebung eine demütigende Frage aus: "entweder war meine Arbeit intelligent, und die Maschine, die mich ersetzt, muss mindestens ebenso intelligent sein, wie ich es war, oder aber die Maschine ist dumm, aber wie war dann meine Arbeit...? „. Die Realität ist aber keineswegs so manichäisch, die Meteorologen bleiben in Tat und Wahrheit wertvolle Ratgeber für ihre Kunden. Ihre Rolle hat sich allerdings verändert und verlangt aussergewöhnliche Kommunikationskompetenzen.

Diese Beobachtung führt uns zur Bionik zurück: Bis gegen Ende des 19. Jahrhunderts versuchten die Flugpioniere den Vogelflug nachzuahmen. Ab dem 20. Jahrhundert konzipierten die Ingenieure ihre Flugzeuge, indem sie sich von diesem Paradigma entfernten. Ein Jahrhundert später fliegen Airbusse mit 500 Personen an Bord über die Ozeane, eine Leistung, welche für die Natur unerreichbar ist, aber diese Flugzeuge sind nicht fähig, sich auf einen elektrischen Draht zu setzen, etwas das jede Schwalbe mit Leichtigkeit vollbringt. Eine ähnliche Entwicklung ist in den Wissenschaften zur künstlichen Intelligenz im Gang. Während die im 20. Jahrhundert erfundenen Systeme versuchten, sich der menschlichen Intelligenz anzunähern, befreien sich die aktuellen Forschungen oft von dieser Referenz. So werden wir mehr und mehr mit Maschinen und Algorithmen konfrontiert werden, welche autonome Lernfähigkeiten aufweisen. Diese Maschinen werden ihre Referenzen in der realen Welt durch Fühler, Sensoren und Beobachtungssysteme finden, aber auch in der virtuellen Welt.

Quellenangabe

Neural interpretation of ECMWF ensemble predictions 2010. Ambühl J., Cattani D. Eckert P. Publikation von MeteoSchweiz.

Dank

Mein Dank geht an MeteoSchweiz, welche die Abbildung 4 zur Verfügung gestellt hat, und an Lysiane Mayoraz für das aufmerksame Korrekturlesen des Textes.

Anhang: Beispiel eines Neurons, das eine antizyklonische Wetterlage über dem Nordatlantik mit Zufluss von Polarluft über Zentraleuropa kodiert.

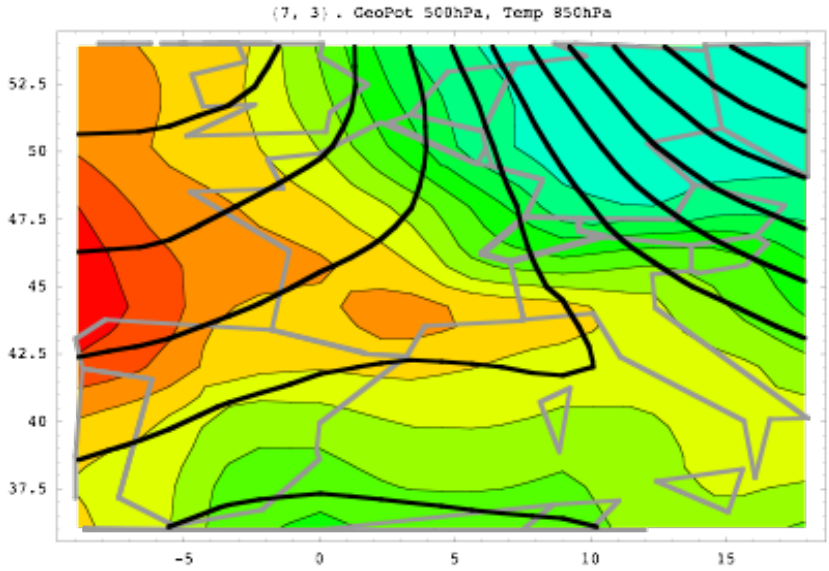

Abbildung 6. Beispiel einer antizyklonalen Wetterlage über dem Nordatlantik, mit Zufluss von Polarluft über Zentraleuropa. Das als {7,3} klassierte Neuron des Netzes (7. Linie, 3. Säule in Abbildung 1) gemäss den Konventionen, die in Abbildung 2 beschrieben sind.

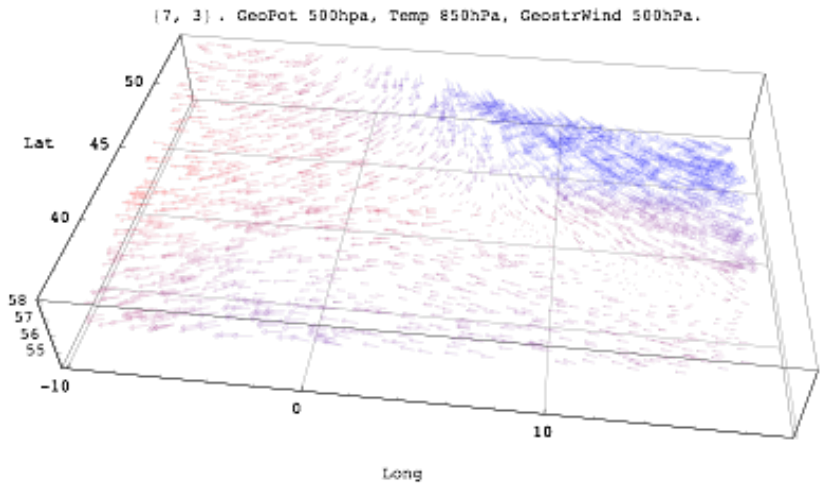

Abbildung 7. Synaptisches Feld des gleichen Neurons {7,3} in drei Dimensionen. Koordinaten sind die Breiten- und Längengrade. Die vertikale Achse stellt die geopotentielle Höhe des Druckfeldes von 500 hPa ausgedrückt in Hektometern dar. Das Windfeld ist so dargestellt, wie es vom Neuron erfasst wird. Man erkennt den Zufluss von Polarluft am nördlichen Alpenrand. Die Verteilung der Temperaturen und das Luftdruckniveau werden an jedem Ort durch die Farbe und die Höhe der Pfeile angegeben.