9

A. WALTER, S. TREPTE, R. THEHOS

Statistische Vorhersage- und Warnverfahren: MOS-MIX, WarnMOS, BlitzMOS und CellMOS

Statistical Prediction- and Warningmethods: MOS-MIX, WarnMOS, BlitzMOS and CellMOS

Zusammenfassung

Numerische Wettervorhersagemodelle (NWP) sind heutzutage in der Lage, das allgemeine Zirkulationsmuster der Atmosphäre für ungefähr eine Woche mit signifikanter Qualität zu simulieren. Dabei werden auch bestimmte Wetterelemente, die von Beobachtungsstationen gemessen und registriert werden, wie z.B. Temperatur, Wind oder Niederschlag, vom Modell ausgegeben und vorhergesagt, teils durch entsprechende Parametrisierungen. Die Qualität dieser Simulationen unter physikalischer Betrachtung ist stark abhängig vom genauen Ort, dem betrachteten Element, der Jahreszeit und der allgemeinen Wettersituation. Die Bandbreite reicht von sehr guter Qualität über systematische Fehler bis hin zu für den Nutzer gegebenenfalls unbrauchbaren Vorhersagen. Statistische Verfahren bieten ein intelligentes Feedback zwischen diesen numerischen Simulationen und den Messungen bzw. Beobachtungen. Sie sind in der Lage, systematische Fehler aus dem Direct Modell Output (DMO) herauszufiltern. Darüber hinaus führen weitere Eingangsvariablen neben dem DMO auch dann zu guten Ergebnissen, wenn der DMO nur eine schlechte Qualität besitzt. Model Output Statistics (MOS) ist ein solches statistisches Post-Processing Verfahren und wird routinemäßig beim DWD betrieben. MOS basiert auf selektiven linearen Regressionsgleichungen und die erhaltenen Korrelationen beschreiben die bestmögliche Prediktor-Prediktand¹ Beziehung, wobei neben dem DMO auch Beobachtungs- und Fernerkundungsdaten genutzt werden.

Abstract

Numerical Weather Prediction Models (NWP) are capable of forecasting circulation patterns of the atmosphere with a significant quality for up to one week. Thereby certain observable variables, such as temperature, wind or precipitation, are forecasted by the model itself, partly as corresponding parametrizations. The quality of these forecasts strongly depends on the specific location, the element of interest, the season and the larger scale weather situation. The spread of quality typically reaches from very good quality to unusable forecasts. Statistical algorithms provide an intelligent coupling between numerical simulations and actual observations and are capable to detect and correct systematic wrong direct model output (DMO) forecasts. Furthermore, additional input variables into these algorithms may lead to increasing forecasts even if the DMO is of poor quality. Model Output Statistics (MOS) is such a powerful statistical post-processing algorithm and is operated routinely at DWD. MOS is based on stepwise linear regression and the obtained correlations are exploited to obtain the best possible predictor-predictand relationship, where the DMO may only serve as one potential predictor beside SYNOP- and remote sensing data.

1 Einleitung

Numerische Wettervorhersagemodelle (NWP-Modelle, Numerical Weather Prediction) berechnen den zukünftigen Zustand der Atmosphäre zu bestimmten Zeitpunkten, indem sie den auf Basis von vielfältigen Messungen ermittelten atmosphärischen Ist-Zustand durch Lösen der atmosphärischen Gleichungen für spätere Zeitpunkte prognostizieren. Diese Prognosen werden für so genannte Gitterpunkte erstellt, mit denen die Erde im Modell netzartig überzogen wird. Die Qualität der Prognosen, besonders für Bodenparameter, nimmt mit zunehmendem räumlichen Abstand dieser Gitterpunkte ab: ein großer Abstand bedingt lokale Ungenauigkeiten, ein feinmaschiges Gitter bietet die Möglichkeit einer feineren regionalen Auflösung.

NWP-Modelle, wie beispielsweise das GME-Modell des Deutschen Wetterdienstes (MAJEWSKI et al. 2000; MAJEWSKI et al. 2002), oder das Vorhersagemodell des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersagen (EZMW)² arbeiten mit einem horizontalen Gitterpunktsabstand von etwa 30 km beziehungsweise 16 km. Dies ist ausreichend, um den zukünftigen Zustand der höheren Atmosphäre gut zu beschreiben, die Prognose von Bodenparametern für bestimmte Orte hingegen ist teilweise zu ungenau für den täglichen Gebrauch. Dies gilt besonders dann, wenn eine räumlich und zeitlich stark variierende Variable (z.B. 10 m-Windgeschwindigkeit) in orografisch stark gegliedertem Gelände betrachtet wird. Zudem besitzen NWP-Modelle weitere Schwächen:

- NWP-Modelle vereinfachen die Gegebenheiten am Boden dadurch, dass die Erdoberfläche als ein Netz von Gitterpunkten interpretiert wird, auf dem die Vorhersagen gültig sind. Demzufolge werden kleinräumige Effekte (z.B. topographische Besonderheiten, kleine Wassermassen, u.a.), die für das lokale Wetter an einem Ort von Bedeutung sind, vernachlässigt. Zudem müssen Variablen oder Punkte, für die Vorhersagen erwünscht sind, nicht explizit im NWP-Modell repräsentiert sein.
- NWP-Modelle sind nicht perfekt und ihre Vorhersagen daher – verglichen mit Beobachtungsdaten – auch mit Fehlern behaftet. Soweit es sich hierbei um systematische Fehler handelt, können auf NWP-Vorhersagen basierende statistische Nachbearbeitungen diese Fehler erfassen und eventuell korrigieren.
- Vorhersagen von NWP-Modellen sind deterministisch. Das heißt, obwohl der zukünftige Zustand der Atmosphäre inhärent unsicher ist, kann durch ein NWP-Modell, bei einem vorgegeben Satz initialer Bedingungen, nur eine Vorhersage erzeugt werden. Die Kombination von NWP Vorhersagen mit statistischen Verfahren erlaubt hingegen die Quantifizierung von Ungenauigkeiten. Insbesondere ist es möglich, statistische Wahrscheinlichkeitsvorhersagen zu generieren.

MOS-Verfahren (Model Output Statistics; GLAHN und LOWRY 1972, CARTER et al. 1989) können dazu benutzt werden, die direkten Vorhersagen von NWP-Modellen (DMO, Direct Model Output) anhand vorher ermittelter statistischer Beziehungen zwischen DMO und langen historischen Messwertsreihen und historischen Modellergebnissen dahingehend zu modifizieren, dass lediglich eine geringstmögliche Abweichung zu aktuellen Beobachtungswerten verbleibt. Im Allgemeinen werden dabei mittels multipler linearer Regression (MLR) diejenigen Parameter (Prediktoren) aus einem langen Datensatz historischer Beobachtungs- und Modelldaten selektiert, welche signifikant dazu beitragen, Variabilität in den interessierenden Parametern (Prediktanden) zu erklären.

2 Model Output Statistics (MOS)

Die Kernaufgabe der MOS-Verfahren liegt darin, statistische Beziehungen zwischen Prediktanden, meist Messungen eines atmosphärischen Zustandes am Boden und/oder in der Höhe, und dem DMO eines NWP-Modells zu einem bestimmten Vorhersagezeitschritt zu bestimmen (statistisches Post-processing). Es wird also die zu einer bestimmten meteorologischen Situation gehörende Statistik des

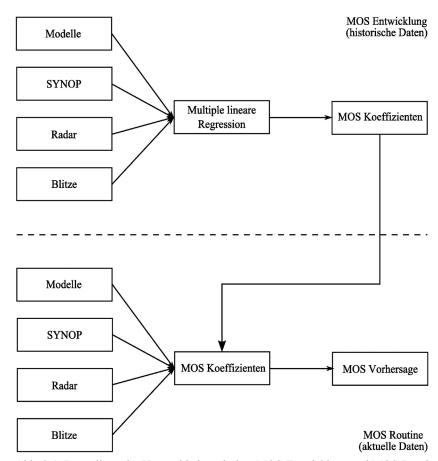


Abb. 9-1: Darstellung der Unterschiede zwischen MOS-Entwicklung und MOS-Routine. Zu beachten ist, das während der Entwicklung historische Daten verwendet werden um die MOS-Koeffizienten zu bestimmen, während im Routinebetrieb aktuelle Daten mit den MOS-Koeffizienten korrigiert werden.

NWP-Modells ermittelt. Ist beispielsweise bekannt, welcher Bodenwind an einem Punkt am wahrscheinlichsten ist, wenn ein Modell für diesen Punkt einen bestimmten Wind in 850 hPa prognostiziert, so kann diese Relation mit Hilfe statistischer Algorithmen quantifiziert werden und hieraus der Bodenwind abgeleitet werden.

Zu diesem Zweck liegen sowohl NWP Vorhersagen des GME und des EZMW-Modells, als auch Beobachtungszeitreihen von SYNOP-Stationen, Blitz- und Radarbeobachtungen über mehrere Jahre archiviert vor. Anhand dieser Datensätze werden in einer sogenannten Entwicklungsphase mit Hilfe einer selektiven Regression Prediktoren nach Signifikanzkriterien selektiert und in einer multiplen linearen Regressionsgleichung implementiert, die dann einen bestmöglichen linearen statistischen Zusammenhang zwischen Prediktoren und Prediktanden beschreibt. Die so erhaltenen Regressionsgleichungen werden operationell mit aktuellen Beobachtungsdaten und Modellvorhersagen betrieben und liefern so eine statistisch korrigierte aktuelle Vorhersage, siehe Abb. 9-1. Um mit zunehmender Länge des Vorhersagezeitraums des NWP-Modells nicht Prognosen von geringerer Qualität als das entsprechende Klimamittel zu erhalten, wird dann tendenziell immer stärker das klimatologische Signal ausgegeben und die stark fehlerhaften Prediktoren des Modells immer stärker vernachlässigt. Am Ende des

Vorhersagezeitraums erhält man schließlich den klimatologischen Erwartungswert.

2.1 Multiple Lineare Regression

Die **m**ultiple lineare **R**egression (MLR) bezieht eine abhängige Variable *Y*, den Prediktand, auf einen Satz *n* unabhängiger Variablen *X*, die Prediktoren. Das Resultat ist eine Gleichung zur Schätzung des Prediktanden als Linearkombination der Prediktoren

$$\hat{Y} = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n. \tag{1}$$

Die a_n sind hierbei die Regressionskoeffizienten, die so bestimmt werden, dass die Summe der quadratischen Schätzfehler einen minimalen Wert annimmt,

$$\sum_{j=1}^{n} (y_j - \hat{y}_j)^2 = MIN.$$
 (2)

Ein Maß für die Güte einer Schätzung gemäß Gleichung 1 ist die **R**eduktion der **V**arianz (RV)

$$RV = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} (y_j - \overline{y}_j)^2 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} (y_j - \hat{y}_j)^2}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} (y_j - \overline{y}_j)^2}.$$
 (3)

Gleichung 3 ist der Anteil der Variation von Y um den Mittelwert \overline{Y} normiert durch die Varianz

$$\sigma_{y}^{2} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} (y_{j} - \overline{y})^{2}$$
 (4)

der durch die Regressionsbeziehung (Gleichung 1) erklärt werden kann. Aus den Gleichungen (1) bis (4) ist ersichtlich, dass eine Verminderung der quadratischen Summe der Schätzfehler gleichbedeutend ist mit einer Reduktion der Varianz RV und somit einer Minimierung der mittleren quadratischen Fehlers (RMSE)

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} (y_j - \hat{y}_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$
 (5)

Eine Technik um einen bestmöglichen Satz von Prediktoren (X_n in Gleichung 1) zur Beschreibung des Prediktanden auszuwählen wird als schrittweise (engl. "stepwise") oder auch selektive Regression bezeichnet (HOCKING 1976, von STORCH und ZWIERS 1999).

Hierbei wird aus einem Pool potentieller Variablen³ mit einer historischen Verfügbarkeit von mindestens 5 Jahren, diejenige Variable ausgewählt, die zum Prediktanden die höchste Korrelation aufweist. Diese Variable erklärt somit die meiste Varianz des Prediktanden. In einem zweiten Schritt wird dann diejenige Variable bestimmt, welche die höchste Korrelation zum unerklärten Rest (Residuum) aufweist. Die Auswahl von Variablen (Prediktoren) wird so lange fortgesetzt, bis ein bestimmtes Signifikanzkriterium nicht mehr erfüllt wird. Auf diese Art wird für alle in Frage kommenden Stationen und alle Variablen zu jedem Vorhersagezeitpunkt jeweils eine bestmögliche Regressionsbeziehung gefunden. Dieses setzt jedoch sowohl unveränderte Messvorschriften als auch konstante Modellversionen voraus, ansonsten müssen Änderungen bei den regelmäßig stattfindenden Neuentwicklungen der Regressionsbeziehungen berücksichtigt werden.

3 MOS-Systeme im DWD

Der DWD betreibt im Routinebetrieb ein weitestgehend von der Firma Meteo Service Weather Research GmbH⁴ entwickeltes System von MOS-Verfahren.

Die Verfahren GME-MOS und EZMW-MOS basieren auf dem DMO dieser beiden NWP-Modelle und werden im Verfahren MOS-MIX gewichtet kombiniert. Diese Kombination bietet zum einen den Vorteil, dass eventuelle Fehlprognosen eines der beiden Modelle "gedämpft" werden, zum anderen kann auf diese Weise auch ein Ausfall eines der beiden Modelle kompensiert werden. Wie bei der Ensemblevorhersagetechnik liefert schon eine einfache Mittelung der Vorhersagen im Mittel bessere Ergebnisse als jedes der Einzelmodelle. Die einzelnen Verfahren werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

Der Zusammenhang bestimmter Prediktoren zum Prediktanden weist einen deutlichen Jahresgang auf. Dieser Jahresgang wird durch eine Klassifikation der eingehenden Datensätze berücksichtigt: sie werden in Sommerund Winterhalbjahr, bei manchen Anwendungen in vier Jahreszeiten aufgeteilt. Um ein plötzliches Umschalten zwischen den Jahreszeiten zu vermeiden wird auch hier linear interpoliert. Die bei der Aufteilung in verschiedene Jahreszeiten gewonnene Homogenität führt jedoch zu einem reduzierten Umfang an klassifizierbaren Datensätzen. Da die primäre Ursache für die jahreszeitliche Instationarität der Regressionskoeffizienten in der sich über das Jahr ändernden Strahlungsbilanz zu suchen ist, wird die Abhängigkeit der Koeffizienten von der Jahreszeit mittels einer harmonischen Funktion beschrieben. Dazu kann ein Jahr in beispielsweise 36 Dekaden aufgeteilt werden, für die lineare Korrelationskoeffizienten mittels selektiver Regression (Abschnitt 2) bestimmt werden. Diese Korrelationskoeffizienten werden dann einer harmonischen Analyse unterzogen und ihr geglätteter Jahresgang anschließend mit Sinus- und Cosinus-Funktionen approximiert. An Stelle der Original-Prediktoren werden dann in der Regressionsbeziehung die mit dem am jeweiligen Tag gültigen Regressionskoeffizienten gewichteten Prediktoren verwendet.

Als weitere Prediktorengruppe sind Persistenzprediktoren ein wichtiger Bestandteil des MOS-Systems. Be-

sonders im Nowcast- und Kürzestfristbereich führen persistenzdominierte Regressionsgleichungen zu guten Ergebnissen (LEYENDECKER 2007). Typischerweise werden Persistenzprediktoren der letzten drei Stunden sowie der entsprechende Vortagswert (-24 Stunden) verwendet.

Zur Vorhersage von Überschreitungswahrscheinlichkeiten bestimmter Schwellenwerte, eine wesentliche Aufgabe der MOS-Systeme, werden die Abhängigkeiten der Wahrscheinlichkeitsprediktanden vom Prediktanden auf dem der Schwellenwert definiert ist, durch geglättete Stufenfunktionen beschrieben (HOFFMANN 2008). Ein Satz entsprechend transformierter Prediktoren wird ebenfalls dem Regressionsalgorithmus verfügbar gemacht (ARRIT und FRANK 1985).

Neben diesen auf Grund physikalischer Plausibilitätsbetrachtungen transformierten Prediktoren, werden dem Regressionsalgorithmus zudem empirisch transformierte Prediktoren⁵ angeboten. Für stationsbezogene Beobachtungen als auch für Fernerkundungsdaten werden sogenannte Advektions-Prediktoren bereitgestellt (HOFFMANN 2008). Dabei wird ausgenutzt, dass um den Vorhersageort gelegene andere Beobachtungsstationen bzw. zeitlich und räumlich dicht vorliegende Fernerkundungsdaten (z.B. Niederschlag) oft sehr wertvolle prognostische Information liefern, wenn es sich um Prediktanden handelt, die sich während der Advektion nur wenig verändern. Mit Hilfe des Modellwindes wird dazu, ausgehend vom Vorhersageort, eine Rückwärtstrajektorie gerechnet um den Ursprungsort der Advektion festzulegen. Weiterhin kommen binäre Funktionen als Prediktoren zum Einsatz, die beispielsweise Diskontinuitäten in einer Modelldatenreihe, etwa durch den Wechsel einer Modellversion, abfangen sollen.

3.1 MOS-MIX

Die Basis des MOS-Systems beim Deutschen Wetterdienst bilden die GME- und die EZMW-MOS-Vorhersagen. Das GME-MOS basiert auf dem jeweils aktuellen DMO des GME-Modells (0 und 12 UTC) und das EZMW-MOS basiert auf dem 12 UTC-Modelllauf des EZMW-IFS.

MOS-MIX (HAALMAN 2001a) liefert auf Basis dieser Einzelmodell-MOS-Systeme Vorhersagen, wobei eine vom Prediktanden, vom Vorhersagezeitpunkt und von der Jahreszeit abhängige gewichtete Mittelung beider Modelle berechnet wird. Zurzeit werden Vorhersagen für mehrere Tausend Punkte weltweit bis zu einem Vorhersagzeitraum bis +168 Stunden ausgegeben.

3.2 BlitzMOS

Das BlitzMOS-System (BMOS; KNÜPFFER 2001) arbeitet auf einem Gitter mit einem Gitterpunktsabstand

von 0,25 x 0,375 Grad, entsprechend etwa 27 x 27 km, über Deutschland. Basierend auf Blitzortungsdaten berechnet BMOS operationell viertelstündige flächendeckende Vorhersagen der Gewitter- und Blitzwahrscheinlichkeit für Deutschland. Gewitterereignisse direkt bei einer Messstation sind relativ selten, um dennoch stabile Regressionsbeziehung zwischen Gewitterprediktanden und -prediktoren zu gewährleisten, wurde für das Verfahren ein so genannten Multi-Stations-Ansatz gewählt, bei dem Gitterpunkte mit ähnlichen topographischen und regionalen Eigenschaften zu Clustern von 20 bis 30 Gitterpunkten zusammengefasst werden. Durch diese breitere Datenbasis - es resultiert die 20- bis 30-fache Fallzahl pro Regression - ist gewährleistet, dass belastbare Regressionsbeziehungen gefunden werden und diese Beziehungen auch für seltene Ereignisse stabil sind.

Da Blitzortungsdaten, im Gegensatz zu den in anderen MOS-Verfahren genutzten Daten, unregelmäßig in Zeit und Raum verteilt sind, müssen diese Daten möglichst ohne Informationsverlust in Gitterpunktswerte transformiert und geeignete Prediktanden für die Kürzestfristund Kurzfristvorhersage definiert werden. Für einen Vorhersagezeitraum bis zu zwei Stunden sind bei BMOS-Advektionsprediktoren der Blitzortungsdaten, etwa gemäß des Modellwindes in 500 hPa, dominant. Ab einer Vorhersagezeit von sechs Stunden werden diese in ihrer Relevanz zunehmend von weiteren Modellprediktoren abgelöst. Die Persistenz der Blitzortungsdaten ist lediglich innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne von Relevanz (HOFFMANN 2008).

3.3 RadarMOS

Analog zum bestehenden BMOS-Verfahren wurde ein MOS-Verfahren zur Vorhersage von Radarreflektivitäten und daraus ableitbaren Parametern durch die Firma Meteo Service entwickelt. Der RadarMOS-Algorithmus basiert ebenfalls auf Gitterpunkten und hat das Ziel neben Vorhersagen für Radarreflektivitäten auch die damit einher gehenden Wahrscheinlichkeiten für das Überschreiten bestimmter Warnkriterien im Kürzestfristbereich zu generieren. Die Prediktanden werden aus Datensätzen des Radarverbundsystems des DWD definiert. RadarMOS wurde, wie auch BMOS, als unterstützendes System für Folgesysteme wie WarnMOS konzipiert und stellt beim DWD kein eigenständiges MOS-System mehr dar.

RadarMOS und BMOS sind in das Verfahren WarnMOS integriert (siehe Kapitel 3.5)

3.4 CellMOS

Durch den dem CellMOS-Verfahren zu Grunde liegende Ansatz der Einbeziehung von Fernerkundungsdaten (Radar, Blitzortungssysteme, Doppler-Verfahren) in die klassischen MOS-Algorithmen soll eine möglichst realis-

tische Vorhersage der Zugbahn und Eigenschaften von zumeist kleinräumigen und kurzlebigen - Gewitterzellen erreicht werden (HOFFMANN 2008). Somit kann ein wesentliches Problem traditioneller MOS-Systeme in Bezug auf die Vorhersage von Gewitterzellen – das hierfür zu dünne Beobachtungsnetz - umgangen werden. Durch den hier vollzogenen Übergang zum Lagrangeschen Bezugssystem werden einzelne Gewitterzellen selbst zu Objekten der Regression, d.h. es werden Prediktanden für jede im Untersuchungsgebiet geortete Zelle abgeleitet und entsprechende Prediktoren aus Modell, Persistenz etc. für den aktuellen Ort der Zelle berechnet. Neben den genannten Fernerkundungsdaten gehen in CellMOS die GME-Modelldaten ein. Aus der Regression resultieren Gleichungen, die zur Vorhersage individueller Zelleigenschaften (Ort und Form, Verlagerung und Warnparameter) genutzt werden können.

Aus dem Deutschland-Komposit-Radarbild sowie Blitzortungsdaten werden bei CellMOS in einem ersten
Schritt die aktuelle Position und Eigenschaften individueller Gewitterzellen bestimmt. Da zur Prognose von
Veränderungen der Zelleigenschaften - insbesondere
der Zugbahn - die Zelltrajektorien bekannt sein müssen,
werden in einem Zelltracking-Algorithmus die erkannten
Zellorte zweier aufeinander folgender Radarbilder einander zugeordnet. Hierzu können unter anderem die Korrelation der Radarpixel, der 700 hPa-Modellwind, Advektionsparameter aus BMOS und Persistenzen bezüglich der
Verlagerungseigenschaften herangezogen werden.

Für CellMOS werden Vorhersagegleichungen für die verschiedenen Jahreszeiten entwickelt, wobei zu beachten ist, dass die zu Grunde liegenden Ereignisse über das Jahr inhomogen verteilt sind. Zur Berücksichtigung regionaler Besonderheiten beim Zellverhalten wird das Untersuchungsgebiet in zwölf verschiede Gebiete über Deutschland aufgeteilt und individuelle Regressionsbeziehungen für diese berechnet. Zu jeder vollen Stunde werden neue, dem Tagesgang angepasste, Regressionskoeffizienten verwendet. Für eine detaillierte Darstellung des CellMOS-Verfahrens sei hier auf (HOFFMANN 2008) verwiesen.

3.5 WarnMOS

Ziel von WarnMOS ist es, einen aktuellen und vorhergesagten Warnzustand für alle deutschen Landkreise für die 27 vom DWD definierten Warn- bzw. Unwetterkriterien⁶ zu erzeugen um dem Meteorologen im Warndienst eine objektive Entscheidungshilfe zur Verfügung zu stellen. Dieser Warnzustand dient zudem als wesentlicher Input in das automatisierte Warnverfahren AutoWARN des DWD, siehe hierzu den entsprechenden Beitrag in diesem Heft. Neben Synopbeobachtungen, Blitzor-

tungs- und Radardatensätzen sowie CellMOS-Resultaten gehen in WarnMOS die NWP-Daten vom GME- und EZMW-Modell ein, so dass im engeren Sinn von Warn-MOS-MIX gesprochen werden kann. Die meisten Warn-MOS-Prediktanden sind probabilistischer Natur. Für diese Prediktanden wird auf eine Transformationstechnik zurückgegriffen, welche Fernerkundungsdaten mit Hilfe einer geglätteten Stufenfunktion in probabilistische Werte umwandelt (HOFFMANN 2008).

Ein wichtiger Teil des WarnMOS ist die sogenannte Verdichtung: die Reduktion der etwa 150 von WarnMOS generierten Prediktanden auf 27, den DWD-Warnkriterien entsprechenden probabilistische Prediktanden, welche die Wahrscheinlichkeit zur Überschreitung bestimmter warnrelevanter Schwellenwerte in bestimmten Bezugszeiträumen angeben. Bei der Bestimmung dieser landkreisbezogenen Überschreitungswahrscheinlichkeiten ist der Übergang von Punktwahrscheinlichkeiten zu den gewünschten Flächenwahrscheinlichkeiten für Landkreise zu vollziehen. Dabei wird eine repräsentative Station für jeden Landkreis bestimmt an Hand derer Vorhersagen dann auf die Vorhersagewerte für den entsprechenden Landkreis geschlossen werden kann⁷.

Im operationellen Betrieb wird WarnMOS viertelstündlich betrieben, wobei zu jeder vollen Stunde eine Vorhersage bis 24 Stunden gerechnet wird. Zu den Zwischenterminen werden -unter Verwendung aktueller Blitz- und Radardaten - Vorhersagen bis 6 Stunden erstellt. Dreimal täglich (4, 16 und 21 UTC) wird eine Vorhersage bis 168 Stunden berechnet, wobei jeweils die aktuellen Modellergebnisse des GME und des EZMW eingehen.

4 Operationeller Betrieb der MOS-Systeme im DWD

In Abb. 9-2 sind alle MOS-Systeme des DWD dargestellt. Die operationelle Post-Processing-Routine des DWD beinhaltet neben denen in Kapitel 3 beschriebenen MOS-Verfahren zudem das Verfahren AutoTAF (Terminal Aerodrome Forecast), eine durch ICAO-Richtlinien, international normierte Flugwetterprognose für ein(en) bestimmten(s) Flugfeld, -platz oder -hafen (HAALMAN

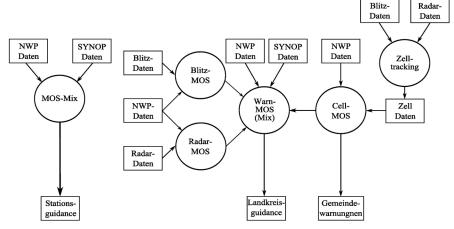


Abb. 9-2: Diagramm des Routine-MOS-Systems im DWD.

2001b). Dieses Verfahren, auf das hier nicht weiter eingegangen werden soll, ist ebenfalls zu den MOS-Verfahren auf Stationsbasis zu rechnen.

Die zeitliche Abfolge der in der Routine laufenden MOS-Verfahren ist in Abb. 9-3 skizziert. WarnMOS liefert zu jeder vollen Stunde eine 24-stündige und alle 15 Minuten eine 6-stündige Prognose. Dazu kommen die langen Läufe bis +168 Stunden um 4, 16 und 21 UTC. Das Verfahren CellMOS (Kapitel 3.4) liefert konstant alle 5 Minuten eine zweistündige Vorhersage der detektierten Gewitterzellen. Ein TAF wird jeweils 15 Minuten nach der vollen Stunde mit einer Gültigkeitsdauer von 30 Stunden erstellt. MOS-MIX-Läufe werden um 0, 1, 3, 4, 15 und 16 Uhr gestartet und liefern Vorhersagen bis 78 bzw. 168 Stunden. Das Verfahren BlitzMOS läuft alle 15 Minuten und liefert statistische Vorhersagen der Blitzaktivität für die nächsten drei Stunden. Auf Grund der großen Zahl von Prediktanden, Stationen und Verfahren können hier nur einige ausgewählte Resultate der MOS-Verfahren dargestellt werden.

In Abb. 9-4 ist beispielhaft der Verlauf des RMSE (Gleichung 5) in Bezug auf den Entwicklungszeitraum aus MOS-MIX für die 2 m-Temperatur der beiden Stationen Helgoland (oben) und Zugspitze (unten) in Abhängigkeit von der Vorhersagedauer für jede Jahreszeit dargestellt. In beiden Fällen wurden im Entwicklungszeitraum ca. 3450 Fälle zur Bestimmung der Regression genutzt. Zunächst ist festzuhalten, dass der RMSE an der Station Helgoland generell niedriger ausfällt als auf der Zugspitze, was durch die geringere Variabilität der 2 m-Temperatur auf Grund der dämpfenden Wirkung der Nordsee

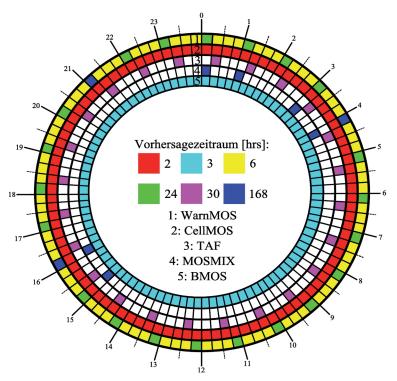


Abb. 9-3: Zeitlicher Ablauf der operationellen MOS-Verfahren in der Routine des DWD. Details siehe Text. Zeitangaben in MEZ.

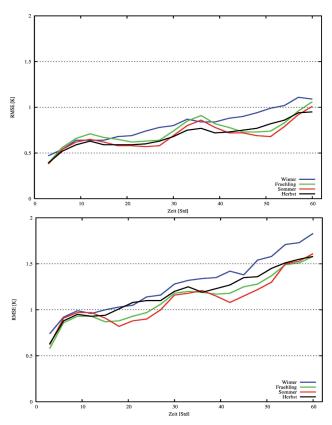


Abb. 9-4: Root Mean Square-Fehler der 2 Meter-Temperatur von MOS-MIX für die Stationen Helgoland (oben) und Zugspitze (unten) in Abhängigkeit von der Jahres- und Vorhersagezeit.

erklärt werden kann. Generell kann bei dieser Variablen eine Zunahme des RMSE von küstennahen zu eher kontinental geprägten beziehungsweise exponierten Stationen beobachtet werden.

Weiterhin fällt auf, dass an beiden Stationen der RMSE im Winter am höchsten ist, was auf die höhere Variabilität und damit verbundene komplexere Struktur der Regressionsbeziehung, der bodennahen Temperatur während des Winters zurückzuführen ist, die von einem linearen Verfahren nur teilweise reproduziert werden kann. Die besten Vorhersagen werden an beiden Stationen demzufolge im Sommer erzielt.

Die Zunahme des RMSE mit zunehmender Vorhersagezeit ist generell sowohl der zunehmenden Unsicherheit der eingehenden Modelldaten als auch des immer stärker Einflusses von Nicht-Linearitäten geschuldet, da Persistenzprediktoren mit zunehmender Vorhersagezeit zusehends an Gewicht verlieren. Vor allem an der Zugspitze nimmt der RMSE innerhalb der ersten sechs Vorhersagestunden stark zu. Abb. 9-5 illustriert beispielhaft den Quotienten der Gewichtung der eingehenden Modelle GME und EZMW in Abhängigkeit von der Jahreszeit (Rot: Winter, grün: Frühling, blau: Sommer und pink: Herbst) mit zunehmender Vor-

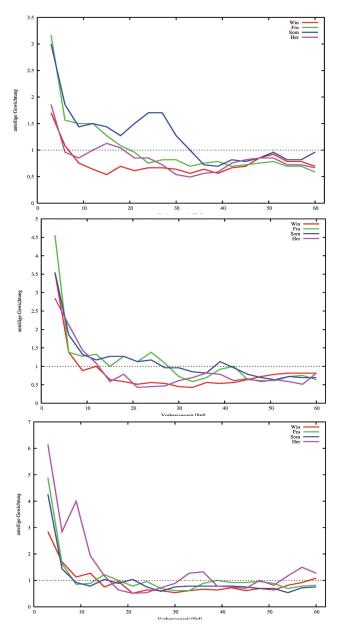


Abb. 9-5: Verlauf der Quotienten der Modellgewichtung GME zu EZMW an den Stationen Helgoland (oben), Brocken (Mitte) und Zugspitze (unten) für MOS-MIX in Abhängigkeit von der Vorhersagezeit und Jahreszeit. Rot: Winter, grün: Frühling, blau: Sommer und pink: Herbst. Element: 2 Meter-Temperatur. Zu beachten ist die unterschiedliche Ordinatenskalierung.

hersagezeit an den Stationen Helgoland (oben), Brocken (Mitte) und Zugspitze (unten). Ein Wert > 1 bedeutet eine stärkere Gewichtung der GME-Ergebnisse, ein Wert < 1 hingegen eine stärkere Gewichtung des EZMW-Modells.

Auf den kurzen Zeitskalen dominiert generell das GME die MOS-MIX-Resultate, wohingegen auf längeren Zeitskalen das EZMW-Modell einen leicht stärkeren Einfluss auf die Endresultate besitzt. Die Prediktoren, die erwartungsgemäß am stärksten zur Reduktion der Varianz beitragen, sind für Helgoland der DMO der 2 m-Temperatur (durchschnittliche Gewichtung über alle Vorhersagezeiten etwa 24 %), für den Brocken die Temperatur zwischen 850 hPa und 1000 hPa (durchschnittliche Gewichtung etwa 25 %) und auf der Zugspitze die Temperatur zwischen

850 hPa und 700 hPa (durchschnittliche Gewichtung etwa 30 %). Für alle drei Stationen erhalten zudem Presistenzprediktoren der jeweils vor Ort gemessenen Temperatur ein hohes Gewicht.

Abb. 9-6 verdeutlicht schließlich die Fähigkeit der hier vorgestellten statistischen Post-Processing Verfahren systematische Modellfehlvorhersagen zu korrigieren. Dargestellt ist die absolute Häufigkeit der Abweichung zwischen Vorhersage (+42 Stunden) und eingetretenem Wert der 2 m-Temperatur als Mittel über 14 Stationen innerhalb Deutschlands⁸. Deutlich zu sehen ist, dass der direkte GME-DMO bei diesem Beispiel einen positiven Bias von 1° C aufweist, das heißt im Mittel eine zu warme Prognose liefert. Zudem liefert der DMO in mehr als 3,5 % der Fälle Fehlprognosen von mehr als +5° C.

GME-MOS verringert zum einen diesen positiven Bias auf 0° C und liefert in 0,5 % aller Fälle eine Prognose von mehr als +5° C Abweichung. Die Quote der absoluten Treffer von GME-MOS liegt bei 22,2 %. MOS-MIX liefert lediglich in 0,3 % aller Fälle Vorhersagen von \geq 5° C und liegt in 24,2 % aller Vorhersagen richtig. Eine weitere deutliche Vorhersageverbesserung ist bei regional feiner aufgelösten Vorhersagen (einzelne Stationen) und bei zeitlich differenzierter Betrachtung (einzelne Jahreszeiten) zu beobachten.

4 Fazit

In der Praxis haben sich die MOS-Verfahren als wertvolle Interpretationshilfen für die Meteorologen erwiesen, insbesondere MOS-MIX wird im Routinebetrieb regelmäßig zu Rate gezogen. MOS-MIX ist darüber hinaus die zentrale Datenart der **O**bjektiv **O**ptimierten **G**uidance (OOG, vergleiche Beitrag von M. Rohn in diesem Heft).

Mit WarnMOS steht ein modernes, umfassendes Hilfsmittel zur Generierung automatischer Warnvorschläge bereit, das durch die Integration in AutoWARN (vergleiche Beitrag von B. Reichert in diesem Heft) einen wesentlichen Beitrag zum innovativen Warnmanagement innerhalb des

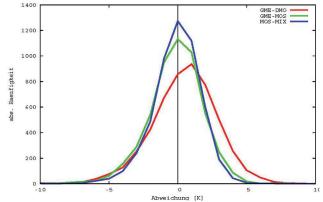


Abb. 9-6: Absolute Häufigkeit des Vorhersagefehlers des GME-DMO (rot), von GME-MOS (grün) und MOS-MIX (blau) als Mittel von 14 repräsentativen Stationen in Deutschland. Jahreswerte 1.1.2008 bis 31.12.2008. Dargestellt ist die absolute Häufigkeit der Abweichung zwischen Vorhersage und eingetretenem Wert.

DWD leisten wird. Die MOS-Verfahren im DWD werden regelmäßig durch Hinzuahme aktueller Mess- und Modellvorhersagereihen aktualisiert und durch die Aufnahme weiterer Stationen erweitert.

Es sei an dieser Stelle auch auf den Beitrag "Verifikation von Unwetterwarnungen" in diesem Heft hingewiesen, der unter anderem Verifkiationsergebnisse der hier besprochenen MOS-Verfahren beinhaltet.

Literatur

- ARRIT, R.W., FRANK, W.M., 1985: Experiments in probability of Precipitation Amount Forecasting Using Model Output Statistics. *Mon. Wea. Rev.* **113**, 1837-1851.
- CARTER, G.M., DALLAVALLE, J.P., GLAHN, H.R., 1989: Statistical Forecasts Based on the National Meteorological Center's Numerical Weather Prediction System. *Weather and Forecasting* **4**, 401-412.
- GLAHN, H.R, LOWRY, D.A., 1972: The Use of Model Output Statistics (MOS) in Objective Weather Forecasting. *J. Appl. Met.* **11**, 1203-1211.
- HAALMAN, D., 2001a: MOS-MIX: Integrated Statistical Interpretation of Multiple Numerical Models. Sixth European Conference On Applications on Meteorology ECAM 2003, Rom, Italien.
- HAALMAN, D., 2001b: AUTOTAF Automatic TAF Production. Fifth European Conference On Applications on Meteorology ECAM 2001, Budapest, Ungarn.
- HOFFMANN, J., 2008: Entwicklung und Anwendung von statistischen Vorhersage-Interpretationsverfahren für Gewitternowcasting und Unwetterwarnungen unter Einbeziehung von Fernerkundungsdaten. Dissertation, Freie Universität Berlin.

Fußnoten

- ¹ Prediktand: vorherzusagende Größe, abhängige Variable; Prediktor: alle potentiell zur Vorhersage des Prediktanden nutzbaren Größen, unabhängige Variablen.
- ² Eine ausführliche Dokumentation des Integrated Forecast Systems des EZMW kann unter http://ecmwf.int/research/ifsdocs/eingesehen werden.
- ³ Als potentielle Prediktoren werden während der schrittweisen Regression in der MOS-Entwicklungsphase neben Modellprognosen auch SYNOP-, Radar- und Blitzbeobachtungen sowie Persistenzprediktoren angeboten.
- ⁴ Siehe auch http://www.mswr.de.
- ⁵ Empisch transformierte Prediktoren dienen unter anderem dazu, nichtlineare Zusammenhänge zwischen Prediktor und Prediktand weitestgehend zu linearisieren.

- HOCKING, R.R., 1976: The Analysis and Selection of Variables in Linear Regression. *Biometrics* **32**, 1-49.
- KNÜPFFER, K., 2001: Lightning MOS A New Approach for Thunderstorm Prediction. Proceedings of ECAM 2001, Budapest, Ungarn.
- LEYENDECKER, V., 2007: Weiterentwicklung eines GFS/MOS-Systems unter Einbeziehung von Beobachtungsdaten zur Verbesserung der Kurzfristvorhersage. Diplomarbeit, Universität Bonn.
- MAJEWSKI, D., LIERMANN, D., PROHL, P., RITTER, B., BUCHHOLD, M., HANISCH, T., PAUL, G., WERGEN, W., BAUMGARDNER, J., 2002: The Operational Global Icosahedral—Hexagonal Gridpoint Model GME: Description and High-Resolution Tests. *Mon. Wea. Rev.* 130, 319-338.
- MAJEWSKI, D., LIERMANN, D., PROHL, P., RITTER, B., BUCHHOLD, M., HANISCH, T., PAUL, G., WERGEN, W., BAUMGARDNER, J., 2000: The global-icosahedral-hexagonal grid point model GME Operational version and high resolution tests. *ECMWF*, Workshop Proceedings, Numerical methods for high resolution global models, 47-91.
- KARL, T.R., SCHLESINGER, M.E., WANG, W.C., 1989: A method of relating general circulation model simulated climate to the observed local climate. Part I: Central tendencies and dispersion. Preprints, Sixth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, 188-196.
- TAUBENHEIM, J., 1969: Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten. Akademische Verlagsanst. *Geest u. Portig*, Leipzig, 386 Seiten.
- von STORCH, H., ZWIERS, F., 1999: Statistical analysis in climate research. *Cambridge University Press*, Cambridge, 470 pp.
- ⁶ Die Warn- und Unwetterkriterien können unter http://www.wettergefahren.de abgerufen werden.
- ⁷ Der Vorhersagewert für das Eintreten eines Ereignisses in einem Gebiet ist immer größer, als die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieses Ereignisses an einem bestimmten Punkt. Eine detaillierte Beschreibung dieses nicht trivialen Übergangs von Punkt- zu Flächenwahrscheinlichkeiten würde den zur Verfügung stehenden Rahmen sprengen, so dass auf die Fachliteratur hierzu, insbesondere (TAUBENHEIM 1969), verwiesen wird.
- Es handelt sich um die Werte 1.1.2008 bis 31.12.2008 (5110 Werte) für die Stationen Hamburg-Fuhlsbüttel, Rostock-Warnemünde, Bremen, Potsdam, Düsseldorf, Leipzig-Schkeuditz, Dresden-Klotzsche, Erfurt-Bindersleben, Trier-Petrisberg, Frankfurt/Main-Flughafen, Stuttgart/Echterdingen, Nürnberg, Lahr und München-Stadt.