

„Regressionsanalysen zur Ableitung  
einer Optimal-Vorhersage, basierend  
auf der Kombination von Kurzfrist-  
vorhersagen der Teilnehmer am  
Berliner Wetterturnier“

Freie Universität



Berlin

Bachelorarbeit  
am Institut für Meteorologie  
im Fachbereich Geowissenschaften

vorgelegt von

Carsten Raymund

Gutachter: Prof. Dr. Henning Rust  
Dr. Martin Göber

14.06.2017



# Zusammenfassung

Im Laufe dieser Arbeit wird eine quasi-operationelle Version des statistischen Vorhersageverfahrens *Moses*, das von der Firma *METEO SERVICE weather research GmbH* (MSwr) entwickelt wurde, vorgestellt, analysiert und verbessert.

Dazu wird zunächst ein Einblick in das Berliner Wetterturnier gegeben, das als Vorhersageplattform für *Moses* dient und in Teilen bereits verifiziert worden ist [Neubarth, 2015]. Darüber hinaus wird auf die automatischen Vorhersageverfahren, die am Turnier teilnehmen, eingegangen. Anschließend werden als Referenz- und Mitteltipps die Verfahren *Moses* und *Petrus* vorgestellt.

Um das Vorhersageverfahren *Moses*, ein Derivat der MSwr-MOS-Technologie, zu analysieren, wird zunächst die Funktionsweise der MOS-Methodik vorgestellt. Hierfür werden die sogenannten Prediktoren und Prediktanden eingeführt sowie der Regressionsalgorithmus beispielhaft erläutert. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird auf das Problem des statistischen Overfittings eingegangen, das mit Hilfe der kritischen Korrelation behandelt wird. Die Kenngrößen einer typischen MOS-Prognosegleichung werden erläutert.

Zur Verbesserung von *Moses* werden in einer quasi-operationellen Version die letzten zwei Jahre des unabhängigen Datensatzes durchlaufen. Dazu wird sowohl die Anzahl der Regressionsgleichungen als auch die modifizierte kritische Korrelation variiert. Anschließend wird nach derjenigen Kombination gesucht, die, gemessen an allen fünf Turnierstandorten, im Vergleich zum operationellen *Moses* die größten Verbesserungen erzielt. Als Ergebnis zeigt sich für jede der 5 Turnierstädte eine Verbesserung bei Verwendung von weniger Regressionsgleichungen und gleichbleibender kritischer Korrelation. Als Folge dieser Arbeit wird die operationelle *Moses*-Version auf die erfolgreichere Kombination umgestellt.



# Abstract

In the course of this work, a quasi-operational version of the statistical forecast method *Moses* developed by *METEO SERVICE weather research GmbH* (MSwr) is presented, analyzed and improved.

An insight into the Berliner Wetterturnier, which serves as a forecasting platform for *Moses* and has already been partially verified [Neubarth, 2015]. In addition, the automatic forecasting systems which participate in the tournament will be discussed. Subsequently, the methods *Moses* and *Petrus* will be introduced as reference and mean tips.

In order to analyze the forecasting method of *Moses* is a derivative of the MSwr-MOS technology, the functioning of the MOS methodology is presented first. For this purpose, the predictors and predicates are explained, as well as the regression algorithm is exemplified. In the further course of this thesis, the problem of statistical overfitting is dealt with, which is treated by the critical correlation. For a better understanding, the characteristic descriptors of a typical MOS-prediction equation are explained.

In order to improve *Moses*, the last two years of the independent data set are passed through in a quasi-operational version. For this purpose, both the number of regression equations and the critical correlation are varied. Afterwards, the combination is determined which achieves the greatest improvements in all five tournament locations compared to the operational *Moses*. As a result for each city, there is an improvement when less regression equations are used and the critical correlation remains the same. As a possible result of this work, a change of the operational *Moses* version on the more successful combination will be applied.



# Inhaltsverzeichnis

|  |     |
|--|-----|
| Zusammenfassung.....                                   | I   |
| Abstract.....  | II  |
| Inhaltsverzeichnis.....                                | III |
| 1 Einleitung.....                                      | 1   |
| 1.1 Motivation und Zielsetzung.....                    | 1   |
| 1.2 Daten.....   | 2   |
| 2 Wetterturnier.....                                   | 3   |
| 2.1 Beschreibung des Wetterturniers.....               | 3   |
| 2.2 Automatische Vorhersageverfahren.....              | 4   |
| 2.3 Referenz- und Mitteltipps.....                     | 5   |
| 3 Methodische Grundlagen.....                          | 6   |
| 3.1 Prediktanden und Prediktoren.....                  | 6   |
| 3.2 Regressionsalgorithmus.....                        | 7   |
| 3.3 Kritische Korrelation als Abbruchkriterium.....    | 9   |
| 3.4 Kenngrößen der MOS-Prognosegleichungen.....        | 10  |
| 4 Moses-Kombinationen.....                             | 12  |
| 4.1 Anzahl der Regressionsgleichungen.....             | 14  |
| 4.2 Konfidenz-Level für die kritische Korrelation..... | 17  |
| 5 Ergebnis und Auswertung.....                         | 19  |
| 6 Zusammenfassung und Ausblick.....                    | 26  |
| Anhang.....  | 28  |
| Literaturverzeichnis.....                              | 31  |
| Abbildungsverzeichnis.....                             | 33  |
| Abkürzungsverzeichnis.....                             | 36  |
| Danksagung.....  | 38  |
| Eidesstattliche Erklärung.....                         | 39  |



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

Als Student an der Freien Universität Berlin im Studiengang Meteorologie bin ich unter anderem an Synoptik interessiert, speziell an Wettervorhersagen im Kurzfrist- und Kürzestfristbereich. In diesem Zusammenhang ermöglicht eine Teilnahme am *Berliner Wetterturnier*, das im Studium erlernte theoretische Wissen praktisch anzuwenden und synoptische Erfahrung zu sammeln. Als Praktikant in der Firma *Meteo Service weather research GmbH*, die sich mit statistischen Vorhersagesystemen auseinandersetzt, bin ich innerhalb des *Berliner Wetterturniers* auf die Hintergründe der Verfahren *Moses* und *Petrus* aufmerksam gemacht worden. Bei dem Verfahren *Petrus* wird ein arithmetischer Mittelwert aus den Vorhersagen sämtlicher Turnierteilnehmer erzeugt. *Petrus* setzte von Beginn seiner Teilnahme an Maßstäbe und war häufig sehr weit vorne platziert. *Moses* ist angetreten mit dem Anspruch, *Petrus* zu verbessern, indem den besseren Teilnehmern höhere Gewichte verliehen werden. Das Verfahren *Moses* geht also noch einen Schritt weiter und basiert auf dem gewichteten Mittel der Vorhersagen aller Turnierteilnehmer. Die Motivation für diese Arbeit ergab sich aus dem Widerspruch, dass *Moses* häufig schlechter als der Teilnehmer *Georg* abschneidet, insbesondere an dem Turnierstandort Innsbruck. Das darf nach *Moses*-Philosophie nicht sein. Da die Prognosen von dem Turnierteilnehmer *Georg* dem Verfahren *Moses* zur Verfügung stehen, sollte *Moses* mindestens eine gleich gute Performance innerhalb des Wetterturnieres abliefern wie *Georg*.

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist, die Performance des *Moses* zu verbessern. Dazu wird anhand einer quasi-operationellen *Moses*-Variante eine Regressionsanalyse durchgeführt, in der die Anzahl der Regressionsgleichungen variiert wird. Des Weiteren soll der Einfluss der kritischen Korrelation auf die Vorhersagequalität der *Moses*-Gleichungen untersucht werden. Dementsprechend stellt sich die entscheidende Frage, ab welcher kritischen Korrelation zu viele Teilnehmer noch an der Prognose beteiligt werden, weil danach die Vorhersagen aufgrund von

Overfittings schlechter werden. Die aus den beiden Untersuchungen resultierenden 16 verschiedenen *Moses*-Experimente werden als Hauptbestandteil dieser Arbeit ausgewertet und ihre Ergebnisse miteinander verglichen.

## 1.2 Daten

Klaus Knüpffer hat *Moses*, ein FORTRAN-Programm, das unmittelbar nach Abgabeschluss am Berliner Wetterturnier auf sämtliche Prognosen der Turnierteilnehmer zugreift, entwickelt. Daraus werden auf der Grundlage der Vorhersagen der Teilnehmer der vergangenen Turnier-Wochenenden gewichtet und als *Moses*-Prognose ins Turnier gestellt. Parallel zu dem im operationellen Betrieb befindlichen *Moses* wurden insgesamt 16 unterschiedliche quasi-operationelle Konfigurationen geschaffen, die Regressionsgleichungen mit den daraus hervorgehenden Prognosen erzeugen. Eine Auswerteroutine übersetzt, genau wie bei dem Berliner Wetterturnier, die eingesteuerten Vorhersagen in Turnierpunkte. Mithilfe dieser Auswerteroutine ist es möglich gewesen, die jeweils letzten zwei Jahre des Wetterturniers mit den 16 quasi-operationellen Konfigurationen durchlaufen zu lassen, auszuwerten und direkt mit der operationellen *Moses*-Variante zu vergleichen. Datengrundlage dieser Arbeit sind demzufolge die Ergebnisse der oben genannten 16 quasi-operationellen *Moses*-Läufe sowie des operationellen *Moses* als Referenz.

## 2 Wetterturnier

### 2.1 Beschreibung des Wetterturniers

Das Berliner Wetterturnier wurde bereits im Jahr 2000 von Christoph Gatzen, Jan Hoffmann und Sebastian Unger gegründet. Zur damaligen Zeit waren die Gründer noch Studenten der Meteorologie an der Freien Universität Berlin. Gestartet wurde das Berliner Wetterturnier, wie bereits der Name verrät, in Berlin. In den nachfolgenden fünf Jahren erfolgte eine Expansion auf insgesamt fünf Turnierstandorte:

| Turnierstandort | Startdatum | Referenzstation | WMO-Kennung |
|-----------------|------------|-----------------|-------------|
| ① Berlin        | 21.01.2000 | Tegel           | 10382       |
|                 |            | Tempelhof       | 10384       |
|                 |            | Schönefeld      | 10385       |
| ② Wien          | 27.04.2001 | Hohe Warte      | 11035       |
|                 |            | Schwechat       | 11036       |
| ③ Zürich        | 15.03.2002 | Fluntern        | 06660       |
|                 |            | Kloten          | 06670       |
| ④ Innsbruck     | 04.06.2004 | Flughafen       | 11120       |
|                 |            | Universität     | 11320       |
| ⑤ Leipzig       | 01.07.2005 | Schkeuditz      | 10469       |
|                 |            | Holzhausen      | 10471       |

**Abb. 2.1:** Übersicht der Turnierstandorte mit dem jeweiligen Startdatum, sowie den mit der WMO-Kennung versehenen Referenzstationen.

Die Turnierstandorte unterscheiden sich in ihren topographischen Gegebenheiten voneinander. So sind Berlin und Leipzig als Flachlandstationen einzustufen und besonders Innsbruck und Zürich orographisch stark geprägt. Ausgetragen wird das Turnier am Freitag mit wenigen feiertagsbedingten Ausnahmen. Besondere Zutrittschürden zur Teilnahme am Wettbewerb gibt es nicht, lediglich die Angabe eines Spielernamens und eines Passworts zur eindeutigen Identifikation ist erforderlich. Im Laufe der Jahre ist ein überaus gemischtes Teilnehmerfeld, welches von synoptisch interessierten Schülern, über Studenten der Meteorologie

und Geographie bis hin zu professionellen Berufsmeteorologen bei namhaften Dienstleistern reicht, entstanden. Der Turniermodus sieht vor, dass jeder Teilnehmer Vorhersagen für 12 Wetterelemente, die gleichzeitig auch Prediktanden von *Moses* sind, für jeweils Samstag und Sonntag bis Freitag 15:00 UTC einsteuert. Dabei können maximal 200 Punkte erreicht werden, je 100 am Samstag und 100 am Sonntag. Die Maximalpunktzahl wurde jedoch in der gesamten Turniergeschichte von keinem Teilnehmer jemals erreicht. Die folgende Tabelle wurde der Diplomarbeit von Gregor Neubarth[Neubarth, 2015] übernommen und leicht modifiziert.

| Prediktand        | Elementkürzel | Vorhersage- |             | Maximalpunktzahl |
|-------------------|---------------|-------------|-------------|------------------|
|                   |               | zeitpunkt   | zeitraum    |                  |
| Bedeckungsgrad    | N [octa]      | 12 UTC      |             | 6                |
| Sonnenscheindauer | Sd [%]        |             | 00 - 00 UTC | 5                |
| Windrichtung      | dd [dekagrad] | 12 UTC      |             | 9                |
| Windstärke        | ff [kn]       | 12 UTC      |             | 6                |
| Windspitze        | fx [kn]       |             | 06 - 06 UTC | 4                |
| Wetterzustand     | Wv            |             | 06 - 12 UTC | 10               |
| Wetterzustand     | Wn            |             | 12 - 18 UTC | 10               |
| Luftdruck         | ppp [hPa]     | 12 UTC      |             | 10               |
| Temperaturmaximum | TTm [°C]      |             | 06 - 18 UTC | 10               |
| Temperaturminimum | TTn [°C]      |             | 18 - 06 UTC | 10               |
| Taupunkt          | TTd [°C]      | 12 UTC      |             | 10               |
| Niederschlag      | RR [mm]       |             | 06 - 06 UTC | 10               |

**Abb. 2.2:** Auflistung sämtlicher Wetterelemente, im weiteren Verlauf auch Prediktanden, für jeweils Samstag und Sonntag beim Berliner Wetterturnier. Dazugehörig die Elementkürzel, sowie erreichbare Punktzahl. Einteilung in Punkt- und Intervallsprognosen.

Die Vorhersageparameter sind einzuteilen in Punktprognosen, die auf einen bestimmten Termin ausgerichtet sind und Intervallsprognosen, die sich auf einen Zeitraum beziehen.

## 2.2 Automatische Vorhersageverfahren

Am Berliner Wetterturnier nimmt eine nicht zu vernachlässigende Anzahl an automatischen Vorhersageverfahren teil, die als sogenannte Automaten gelistet werden und in den Wertungen durch (‘a’) hinter dem Namen gekennzeichnet sind. Die Automaten zählen zur Kategorie der *a-priori*-Verfahren und teilen sich in zwei Klassen auf. Die erste Klasse bezieht sich auf auf einzelnen Modellen

basierende MOS-Systeme und die zweite Klasse auf verschiedene MOS-Mixe. Das Kürzel MOS steht für Model Output Statistics.

### 2.3 Referenz- und Mitteltipps

Die *Persistenz*-Prognose mit der Behauptung „*alles bleibt so wie es ist*“, läuft bei dem Berliner Wetterturnier als Referenz Tipp mit. Bei der Persistenz handelt es sich um das Wetter vom Donnerstag vor dem Turnierwochenende für jeweils Samstag und Sonntag. Dabei wird der Mittelwert aus den Beobachtungen beider Stationen einer Turnierstadt gebildet.

Die Mitteltipps, die am Wetterturnier teilnehmen, fallen in die Klasse der a-posteriori-Verfahren, da sie vom Späteren her, also unmittelbar nach Abgabeschluss, erzeugt und eingesteuert werden. Die beiden Verfahren *Petrus* und *Moses* sind hierbei noch einmal gesondert zu nennen, da sie sich durch eine dauerhafte und regelmäßige Teilnahme in allen fünf Städten auszeichnen. Hinter dem Verfahren *Petrus* verbirgt sich die gleichgewichtete Mittelwertprognose des gesamten Teilnehmerkollektivs. *Moses* ist hingegen ein gewichtetes Mittel, in das die Teilnehmer mit den besseren Prognosen stärker eingehen. Jegliche Mittelwertbildung geschieht wie folgt: Bei den linearen Vorhersagegrößen wie dem Bedeckungsgrad  $N$ , der relativen Sonnenscheindauer  $rSd$ , dem 10-Minuten-Mittelwind  $ff$ , dem Luftdruck  $ppp$ , der Höchsttemperatur  $TTm$ , der Tiefsttemperatur  $TTn$  und dem Taupunkt  $TTd$  wird jeweils ein arithmetischer Mittelwert gebildet. Ob die Elemente Windböe  $fx$  und Niederschlag  $RR$  prognostiziert werden, wird zunächst per Mehrheitsentscheid ermittelt. Anschließend wird erneut der arithmetische Mittelwert aus den vorhergesagten Böen oder Niederschlägen gebildet. Die signifikanten Wetterzustände wie Wetter Vormittag  $Wv$  sowie Wetter Nachmittag  $Wn$  werden nach einer Reihe von weiteren Mehrheitsentscheidungen getroffen. So wird zum Beispiel in trockene (0, 4) und nicht trockene (5, 6, 7, 8, 9), stratiforme (5, 6, 7) und konvektive (8, 9), sowie im stratiformen Fall in flüssige (5, 6) und feste (7) Wetterzustände unterschieden. Im konvektiven Fall erfolgt ein weiterer Mehrheitsentscheid zwischen Schauer (8) und Gewitter (9).

## 3 Methodische Grundlagen

Die Atmosphäre der Erde zeigt häufig nicht vorhersagbare und chaotische Eigenschaften. Selbst die aufwändigsten physikalischen Modelle liefern keine fehlerfreien Prognosen in Bezug auf das Verhalten der Atmosphäre. Induktive bzw. statistische Modelle wie zum Beispiel MOS-Verfahren sind jedoch ein nützliches Hilfsmittel, da sich mit Hilfe dieser Prediktoren Zusammenhänge zwischen den physikalischen Vorhersagen und beobachteten Wetterelementen Prediktanden herausarbeiten lassen. Die lineare Regression bildet den Standardfall einer MOS-Gleichung. Zusätzlich zu den bereits erwähnten MOS-Systemen existieren sogenannte MOS-Mix-Systeme, die nicht nur auf einzelnen, sondern auf mehreren physikalisch-numerischen Wettermodellen beruhen.

### 3.1 Prediktanden und Prediktoren

Die Prediktanden stellen in MOS-Systemen diejenigen Größen dar, die vorhergesagt werden sollen. Liegen ausreichend lange Zeitreihen an historischen Beobachtungsdaten vor, eignen sich im Prinzip sämtliche Wetterelemente als Prediktanden in einem MOS-System. Eine Grundvoraussetzung ist jedoch, dass zu den jeweiligen Prediktanden auch Prediktoren mit signifikanten linearen Zusammenhängen existieren, da nur lineare Zusammenhänge erkannt werden und in prognostische Informationen umgesetzt werden können. Aus diesem Grund werden nicht-lineare Zusammenhänge mithilfe analytischer oder empirischer Transformation vom Prediktor und/oder Prediktand vor Anwendung der linearen Regression linearisiert. Die Qualität von MOS-Vorhersagen steht ihm direkten Bezug zur Qualität der Entwicklungsdatenreihen.

Prediktoren sind Bestandteile der MOS-Gleichungen und spiegeln die für die Prognose verwendeten Größen wider. Der Regressions-Algorithmus selektiert

sie aus einer typischerweise viel größeren Anzahl (mehr als 100) potentieller Prediktoren. Eine besondere Bedeutung kommt der Festlegung der Anzahl der Prediktoren zu. Bei Gleichungen, die zu viele Prediktoren nutzen, kommt es zum sogenannten statistischen Overfitting. Hierbei treten zufällig vorhandene Zusammenhänge in den Gleichungen auf, die bei der operationellen Anwendung Fall zu fehlerbehafteten Prognosen führen.

Die Hauptgruppe im Bereich der Prediktoren bilden die Modellprediktoren, die direkte prognostische Informationen beinhalten. Diese liegen in Form der Vorhersage von Druck, Temperatur oder Feuchte und sogenannten Direct Model Output vor. Letzteres beinhaltet physikalisch approximierte Vorhersagen für die in Bodennähe beobachteten Wetterelemente. Aus diesen Modelldaten werden zusätzliche Prediktoren abgeleitet, um in dem Modelldatensatz mehr lineare Eigenschaften für die Regression zu erzeugen.

Häufige Verwendung in MOS-Systemen findet die Gruppe der wetterunabhängigen Prediktoren. Diese beschreiben zum Beispiel jahreszeitenabhängige Zusammenhänge mit Sinus- bzw. Cosinus-Funktionen der Jahreszeiten in unterschiedlichen Frequenzen.

Als wichtiger Bestandteil in MOS-Systemen bringen Persistenzprediktoren die letzten Beobachtungen der Prediktanden in die Regression ein.

## 3.2 Regressionsalgorithmus

Sämtliche MOS-Systeme basieren auf dem statistischen Verfahren der Regression, indem ein linearer Zusammenhang zwischen den unabhängigen Variablen  $x$  (Prediktoren) und den abhängigen Variablen  $y$  (Prediktanden) hergestellt wird. Graphisch ist dies eine Gerade mit der Eigenschaft, die Fehlerbalken der  $x$ - und

y-Paare so gering wie möglich zu halten. Das nun folgende Formelwerk sowie die Methodik sind in starker Anlehnung an [Wilks, 1995] entstanden:

Der Zusammenhang zwischen den Variablen x und y kann durch

$$\hat{y}_i = \hat{a} + bx_i \quad (1)$$

hergestellt werden. Wobei die *Residuen* bzw. Fehler als

$$e_i = y_i - \hat{y}(x_i) \quad (2)$$

definiert sind. Aus der Summe der Vorhersagewerte und der Fehler lässt sich die sogenannte Regressionsgleichung erzeugen:

$$y_i = \hat{y}_i + e_i = \hat{a} + bx_i + e_i \quad (3)$$

Mit der Bedingung, die Fehlersumme möglichst gering zu halten, kann nach simplen Umformungen die explizite Berechnung der Konstanten a sowie der Steigung b erfolgen:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (4)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (5)$$

Gleichung (1) mit lediglich einem Prediktor ist häufig nicht ausreichend, da dieser die Fehlervarianz selten hinreichend reduziert. Deshalb kommt eine mehrdimensionale Kombination verschiedener Prediktoren zum Einsatz. Der verwendete Prediktorensatz wird in jedem Regressionsschritt nach dem am besten zum Residuum, d.h. dem Fehler der letzten Regressionsgleichung korrelierten Prediktor durchsucht und der bestehenden Gleichung beigefügt. Die dazugehörigen Koeffizienten werden erneut berechnet. Diese Methode wird *Screening Regression* genannt und erzeugt eine mehrdimensionale Gleichung der Form

$$\hat{y} = c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + \dots + c_M x_M \quad (6)$$

, in der  $M$  die Anzahl der verwendeten Prediktoren  $x_i$  darstellt und  $c_i$  die Koeffizienten. Zusammenfassend entsteht schrittweise eine mehrdimensionale Gleichung, die für die enthaltenen Prediktoren die maximale Reduktion der jeweils verbleibenden Fehlervarianz garantiert beziehungsweise den minimierten mittleren quadratischen Fehler (RMSE, s. Kap. 3.4). Der RMSE wird nachfolgend in Kapitel 3.4 erläutert.

### 3.3 Kritische Korrelation als Abbruchkriterium

Wie bereits in Kapitel 3.1 angesprochen, hängen die Stabilität der Regressionsgleichung und die damit einhergehende Güte der Prognose maßgeblich von der Qualität und insbesondere von der Anzahl der verwendeten Prediktoren ab. Da in jedem Regressionsschritt derjenige Prediktor in die mehrdimensionale Gleichung aufgenommen wird, der die höchste Korrelation zum Residuum aufweist, erfolgt ein Abbruch der Screening Regression über einen Schwellenwert der Korrelation zum Residuum. Erreicht kein potentieller Prediktor diese sogenannte kritische Korrelation, bricht die multiple lineare Regression ab, und es wird kein weiterer Regressionsschritt ausgeführt. Die Berechnung der kritischen Korrelation erfolgt mit der Formel

$$R_{krit} = \frac{\left(-\ln\left(2\frac{S}{pp}\right)\right)^{0,6135}}{\sqrt{n-1}} \quad (7)$$

, in der  $n$  die Anzahl der Regressionsfälle darstellt,  $S$  ein Konfidenz-Level sowie  $pp$  die Anzahl der potenziellen Prediktoren [Enke, 1988].

Das Konfidenz-Level  $S$  ist frei wählbar und wird willkürlich festgelegt und beträgt bei MSwr-MOS 0,09. Dieser Wert liefert im Mittel über alle Vorhersagegleichungen die besten Werte. Es besteht aber wegen der eingangs geschilderten Moti-

vation (zu viele Prediktoren nach 'Georg' in der Innsbruck-Gleichung) der Verdacht, dass es für die später zu untersuchende spezielle Moses-Anwendung ein anderes optimales Konfidenz-Level gibt, der die in Kapitel 4.1 beschriebenen Experimente mit Vorfaktoren vor  $R_{krit}$  veranlasste. Das Resultat ist ein künstlich herauf- oder herabgesetzter Schwellenwert, der überflüssige Prediktoren nicht in die Regressionsgleichung aufnimmt, da sonst der bereits beschriebene Effekt des statistischen Overfittings auftreten kann.

### 3.4 Kenngrößen der MOS-Prognosegleichungen

Um die Eigenschaften der Prediktor- bzw. Prediktandenreihe beschreiben zu können, wird in dieser Arbeit der Mittelwert (MV) sowie die Standardabweichung (SD) genutzt. Die Standardabweichung schätzt die Streuung der Reihe ab und ist über folgende Formel definiert:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

Wie bereits am Ende des Kapitels 3.2 erläutert, wird innerhalb der Screening Regression der Korrelationskoeffizient zwischen dem Prediktor (Pr) und dem Prediktand (Pd) berechnet. Dieser wird folgendermaßen ermittelt:

$$R_{Pr,Pd} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(Pd_i - \overline{Pd}) * (Pr_i - \overline{Pr})]}{SD_{Pd} * SD_{Pr}} \quad (9)$$

Der Korrelationskoeffizient gibt an, inwieweit zwei frei wählbare Variablen voneinander abhängen, gibt also Auskunft über das Ausmaß des gegenseitigen linearen Zusammenhangs. Der Wertebereich des Korrelationskoeffizienten liegt zwischen -1 und 1, wobei  $|R| = 1$  bedeutet, dass die Parameter voneinander vollständig abhängen. In der Gleichung (9) bezeichnet  $Pd_i$  die Prediktandenreihe,  $Pr_i$  die Prediktorreihe und die  $\overline{Pd}$  bzw.  $\overline{Pr}$  die gleichnamigen Mittelwerte. Eine weitere statistische Kenngröße ist der *Root Mean Squared Error* kurz RMSE und wird über die Formel

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2} \quad (10)$$

definiert. Der RMSE gibt im allgemeinen Fall die Genauigkeit einer Näherung an. Im speziellen Fall der Regression bildet er ein Maß für die nach dem Regressionschritt übrig gebliebenen Residuen. Die vorangegangenen statistischen Eigenschaften wie zum Beispiel die Standardabweichung oder auch die Korrelation der Prediktoren (Pr) zum Prediktanden (Pd) einer Regressionsgleichung sind besonders bei Aussagen über die Gewichtung der unterschiedlichen Prediktoren wichtig. Ein aussagekräftiges Maß dafür ist das Gewicht (engl. Weight, Wgt) eines Prediktors. Es wird definiert als:

$$Wgt = \frac{CO_{Pr} * SD_{Pr}}{\sum_{i=1}^n |CO_i * SD_i|} * 100\% \quad (11)$$

In der Gleichung (11) steht  $SD_{Pr}$  für die Standardabweichung der Prediktordatenreihe und  $CO_{Pr}$  für den Regressionskoeffizienten des entsprechenden Prediktors. Innerhalb einer Regressionsgleichung addieren sich die Beträge der Prediktorengewichte zu 100%. Im Gewicht des Prediktors zeigt sich jedoch nicht, wie hoch dieser zur Prediktandenreihe korreliert ist und wie hoch die Standardabweichung der Prediktandendatenreihe ausfällt. Das Gewichtungsmaß wurde aus diesem Grund um den sogenannten Beitrag (engl. Contribution, Ctr) erweitert:

$$Ctr = \frac{R_{Pr,Pd} * SD_{Pr} * CO_{Pr}}{SD_{Pd}} \quad (12)$$

Die partiellen Beiträge der in der Regressionsgleichung verwendeten Prediktoren addieren sich zur Gesamt-Reduktion der Fehlervarianz in RV-%.

## 4 Moses-Kombinationen

Um die verschiedenen *Moses*-Kombinationen innerhalb dieses Kapitels näher erläutern zu können, wird an dieser Stelle ein von MSwr verwendetes standardisiertes Tabellenformat eingeführt (Abb. 4.1). Diese sogenannte Regressionstabelle gibt einen Überblick über die *Moses*-Vorhersagegleichung sowie deren wichtigsten Eigenschaften:

| MV  | SD   | r(Pd)        | R_Res           | Name         | dRVI         | Co             | Wgt       | Ctr           |                 |
|-----|------|--------------|-----------------|--------------|--------------|----------------|-----------|---------------|-----------------|
| 8.3 | 9.0  | 0.97         | 0.97            | Georg        | 93.94        | 0.40           | 40        | 38            |                 |
| 8.4 | 8.6  | 0.96         | 0.25            | Enova        | 6.15         | 0.00           | 0         | 0             |                 |
| 8.2 | 8.9  | 0.97         | 0.17            | nik          | 2.73         | 0.12           | 12        | 11            |                 |
| 8.1 | 8.9  | 0.96         | 0.16            | DWD-MOSMix   | 1.04         | 0.09           | 9         | 8             |                 |
| 8.4 | 9.0  | 0.95         | 0.09            | David        | 0.69         | 0.09           | 9         | 9             |                 |
| 7.8 | 9.0  | 0.94         | 0.08            | HELMUT       | 0.66         | 0.07           | 7         | 6             |                 |
| 8.6 | 8.6  | 0.95         | 0.07            | Eugenia      | 0.70         | 0.11           | 11        | 10            |                 |
| 7.8 | 9.0  | 0.95         | 0.05            | Ms.Os        | 0.17         | 0.06           | 6         | 5             |                 |
| 8.1 | 8.9  | 0.96         | 0.04            | Hurricane    | 0.07         | 0.08           | 8         | 7             |                 |
| 8.1 | 9.05 | RMSE<br>2.08 | E(RMSI)<br>2.09 | RV(HC)<br>95 | E(RVI)<br>95 | Const<br>-0.16 | N_Pr<br>9 | N_Obs<br>4796 | R_krit<br>0.035 |

**Abb. 4.1:** *Moses*-Vorhersagegleichung im Standard-Tabellenformat. Beispielgleichung beider Vorhersagetage für den Turnierstandort Innsbruck, Prediktand TTm (Höchsttemperatur in *Moses*-internen Einheiten von 06 UTC bis 18 UTC)

Nach dem Muster der bereits in Kapitel 3 beschriebenen Screening Regression werden die in den Regressionsschritten verwendeten Prediktoren tabellarisch aufgelistet. Die Spalten der Tabelle erklären sich wie folgt:

- MV            *Mean Value*: Mittelwert des Prediktors
- SD            Standardabweichung des Prediktors
- R(Pd)        Korrelation des Prediktors zum Prediktanden
- R\_Res        Korrelation des Prediktors zum Residuum
- Name        Name des Prediktors
- dRVI        Erwartete RV durch Hinzunahme des Prediktors an

- unabhängigen Daten in %
- Co.           Regressionskoeffizient
- Wgt.         prozentuales Gewicht des Prediktors (Summe = 100%)
- Ctr.         Beitrag (engl. *Contribution*): RV-normiertes Beitragsmaß

Im unteren Bereich der Tabelle schließen einige zusätzliche Größen die Information über die Regressionsgleichung ab:

- RMSE        Root Mean Squared Error der Gleichung
- E(RMSI)     Erwarteter RMSE an unabhängigen Daten
- RV           Reduktion der Fehlervarianz
- E(RVI)      Erwartete Reduktion der Fehlervarianz an unabhängigen Daten
- Const.      Regressionskonstante der Gleichung
- N\_Pr         Anzahl der verwendeten Prediktoren
- N\_Obs       Anzahl der Observation
- R\_krit      kritische Korrelation (vgl. Kap. 3.3)

In der gezeigten *Moses*-Vorhersagegleichung im Standard-Tabellenformat spiegelt die Reihenfolge in der Tabelle nicht die Wichtigkeit der Prediktoren wider. Die Regressionskoeffizienten verändern sich in der Regel nach jedem Regressions-schritt, da die Prediktoren untereinander häufig stark korrelieren.

Der erste Prediktor wird nach der höchsten Korrelation zum Prediktanden gesucht, in Abb. 4.1 reduziert der Prediktor *Georg* im entsprechenden Regressions-schritt bereits 93,94% der Fehlervarianz (dRVI). Mit einem Gewicht von 40% beziehungsweise einem Beitrag (Ctr) von 38 RV-%, bildet der Prediktor *Georg* schon den Hauptbestandteil der Gleichung. Im zweiten Regressionsschritt folgt der Prediktor *Enova*, der die nach dem ersten Regressionsschritt verbliebene Fehlervarianz nochmals um 6,15% (dRVI) reduziert. Nach Abschluss der multiplen linearen Regression hat dieser Prediktor mit einem Gewicht von 0% und einem Beitrag von 0% keinen erklärenden Charakter mehr, da sich, wie bereits

beschrieben die Gewichtung des Prediktors durch Hinzunahme weiterer Prediktoren geändert hat. Die synoptische Information wurde in den nachfolgenden Regressionsschritten durch weitere Prediktoren ersetzt. Im dritten Regressionsschritt wird der im Vergleich zu *Georg* ähnlich hoch zum Prediktanden korrelierte Prediktor *nik* in die Vorhersagegleichung aufgenommen, da dieser die erwartete reduzierte Fehlervarianz an unabhängigen Daten nochmals um 2,73% (dRVI) reduziert. Im Anschluss an den Prediktor *nik* folgen sechs weitere Regressionsschritte nach dem gleichen Prinzip. Nach dem neunten Regressionsschritt bricht die Regression mangels ausreichend hoher kritischer Korrelationen der verbliebenen potentiellen Prediktoren ab.

Unter der Prediktortabelle ist zu entnehmen, dass die Gleichung eine recht hohe Qualität besitzt: Mit einem erwarteten RMSE an unabhängigen Daten ( $E(\text{RMSI})$ ) von 2,09 und einer Reduktion der Fehlervarianz von 95% kann die Gleichung die Varianz des vorherzusagenden Prediktanden TTm gut beschreiben.

#### 4.1 Anzahl der Regressionsgleichungen

Innerhalb des Berliner Wetterturniers gibt es Turnierteilnehmer, die sowohl bei den Vorhersagen der insgesamt 12 Einzelelemente als auch für Samstag und Sonntag relative Stärken und Schwächen haben. Aus dieser Hypothese ist eine experimentelle Aufteilung der Regressionsgleichungen sowohl elementspezifisch als auch in zwei Vorhersagetage sinnvoll.

In der ersten *Moses*-Variante werden die beiden Vorhersagetage Samstag und Sonntag zusammengefasst, sowie alle zwölf Elemente mittels einer Regressionsgleichung beschrieben. In der Anfangszeit war diese Kombination aufgrund sehr kurzer Datensätze in den neu eingeführten Städten, an denen *Moses* lernen konnte, die operationelle Variante. Später wurde der *Moses* auf die nachfolgend erläuterte Variante 3 erweitert. Damals gab es seitens von Klaus Knüpfner den subjektiven Eindruck, dass sich die Performance von *Moses* dadurch leicht verschlechtert hat. Die Variante 2 erzeugt insgesamt 2 Regressionsgleichungen,

fasst also weiterhin alle 12 Elemente zusammen, differenziert jedoch nach Samstag sowie Sonntag. Bei der Variante 3 werden im Gegensatz zur zweiten Kombination die beiden Vorhersagetage zusammengefasst, jedoch insgesamt 12 Regressionsgleichungen zur Ermittlung der Prediktoren für die 12 Einzelelemente, siehe Abb. 2.1 aufgestellt. Bei der Variante 4 wird schließlich mit insgesamt 24 Regressionsgleichungen am deutlichsten differenziert: Nach 2 Vorhersagetagen und 12 Elementen.

Um einen Eindruck über die Herkunft der von *Moses* erstellten Vorhersagen zu bekommen, wurden beispielhaft zwei Sätze von *Moses*-Gleichungen, jeweils vom 30.10.2015 und 28.10.2016 für Innsbruck, im Hinblick auf die Anzahl der verwendeten Prediktoren ausgewertet, siehe Abb. 4.2:

| Moses-Variante                           | Unterteilung in Tag und/<br>oder Element | Anzahl der Prediktoren |            |
|--|--|------------------------|------------|
|  |  | 30.10.2015             | 28.10.2016 |
| Variante 1: 6/7 Prediktoren je Gleichung |  | 6                      | 7          |
| Variante 2: 5-7 Prediktoren je Gleichung | Samstag                                  | 7                      | 5          |
|  | Sonntag                                  | 5                      | 6          |
| Variante 3: 2-7 Prediktoren je Gleichung | Bedeckungsgrad                           | 3                      | 3          |
|  | Sonnenscheindauer                        | 4                      | 3          |
|  | Windrichtung                             | 6                      | 7          |
|  | 10-Min.-Mittelwind                       | 3                      | 2          |
|  | maximale Windböe                         | 5                      | 7          |
|  | Wetter Vormittag                         | 5                      | 5          |
|  | Wetter Nachmittag                        | 5                      | 4          |
|  | Luftdruck                                | 3                      | 2          |
|  | Höchsttemperatur                         | 4                      | 2          |
|  | Tiefsttemperatur                         | 4                      | 4          |
|  | Taupunkt                                 | 2                      | 3          |
|  | Niederschlag                             | 4                      | 4          |
| Variante 4: 1-8 Prediktoren je Gleichung | Bedeckungsgrad Sa.                       | 2                      | 3          |
|  | Bedeckungsgrad So.                       | 3                      | 3          |
|  | Sonnenscheindauer Sa.                    | 3                      | 2          |
|  | Sonnenscheindauer So.                    | 3                      | 3          |
|  | Windrichtung Sa.                         | 8                      | 5          |
|  | Windrichtung So.                         | 4                      | 4          |
|  | 10-Min.-Mittelwind Sa.                   | 3                      | 2          |
|  | 10-Min.-Mittelwind So.                   | 3                      | 3          |
|  | maximale Windböe Sa.                     | 4                      | 4          |
|  | maximale Windböe So.                     | 4                      | 3          |
|  | Wetter Vormittag Sa.                     | 3                      | 3          |
|  | Wetter Vormittag So.                     | 5                      | 5          |
|  | Wetter Nachmittag Sa.                    | 3                      | 3          |
|  | Wetter Nachmittag So.                    | 4                      | 3          |
|  | Luftdruck Sa.                            | 3                      | 2          |
|  | Luftdruck So.                            | 3                      | 2          |
|  | Höchsttemperatur Sa.                     | 2                      | 1          |
|  | Höchsttemperatur So.                     | 3                      | 3          |
|  | Tiefsttemperatur Sa.                     | 4                      | 3          |
|  | Tiefsttemperatur So.                     | 3                      | 2          |
| Taupunkt Sa.                             | 2  | 2                      |            |
| Taupunkt So.                             | 2  | 2                      |            |
| Niederschlag Sa.                         | 4  | 4                      |            |
| Niederschlag So.                         | 4  | 4                      |            |

**Abb. 4.2:** Übersicht über die vier Moses-Varianten mit der zuvor bereits beschriebenen Unterteilung in Vorhersagetag und/oder Wetterelement sowie der entsprechenden Anzahl an verwendeten Prediktoren, Moses-Vorhersage für Innsbruck am 30.10.2015 und am 28.10.2016.

Die *Moses*-Variante 1 mit lediglich einer Regressionsgleichung verwendet 6 beziehungsweise 7 Prediktoren. In der *Moses*-Variante 2, bestehend aus jeweils einer Regressionsgleichung für beide Vorhersagetage, kommen 5 bis 7 Prediktoren je Gleichung zum Einsatz. Bei der Variante 3 schwankt die Anzahl der in der Regressionsgleichung aufgenommenen Prediktoren elementweise zwischen 2 und 7. Es wird zudem deutlich, dass bei bestimmten Elementen häufig mehr Prediktoren in die Regressionsgleichung aufgenommen werden als bei anderen. So werden besonders bei der Windrichtung in Richtungsgrad um 12 UTC (dd) 6 oder 7 Prediktoren verwendet, wohingegen im Temperatursegment (TTm, TTn, TTd) lediglich 2 bis maximal 4 Prediktoren mit in die Regressionsgleichung aufgenommen werden. In der *Moses*-Variante 4 schwankt die Anzahl der verwendeten Prediktoren elementspezifisch zwischen 1 und sogar 8 Prediktoren. Die Verteilung bei der Windrichtung zeigt erneut zwischen 4 und 8 Prediktoren, während bei den Temperaturen lediglich 1 bis 4 Prediktoren ausgewählt werden. Die Unterschiede der Anzahl der Prediktoren bezüglich Samstag und Sonntag als auch bei den beiden beispielhaft ausgesuchten Datensätzen sind dagegen eher gering.

## 4.2 Konfidenz-Level für die kritische Korrelation

Ein Faktor, multipliziert mit der kritischen Korrelation, dient dazu das Abbruchkriterium künstlich herauf- oder herabzusetzen, um statistisches Overfitting zu verhindern. Die bereits vorgestellten vier *Moses*-Varianten werden nachfolgend mit vier unterschiedlichen Korrelationen versehen, sodass insgesamt 16 *Moses*-Kombinationen untersucht werden können. Die Wahl der Vorfaktoren orientierte sich dabei am operationellen *Moses*. Beim operationellen *Moses* werden derzeit 12 Regressionsgleichungen erzeugt (Variante 3) und die kritische Korrelation mit 1 multipliziert. Um nun die Auswirkung des Faktors zu untersuchen wurden weitere Faktoren eingeführt, nämlich 0,5 und 0,7. Zusätzlich wurde im Vergleich dazu ein relativ hoher Faktor von 1,4 gewählt um sicher zu stellen, dass sehr wenig Prediktoren in die Regressionsgleichung aufgenommen werden.

Um die Auswirkung eines Vorfaktors auf die Regressionsgleichung und die Wahl der Prediktoren zu erläutern, wird anschaulich am Beispiel der *Moses*-Gleichung aus Kapitel 4 mit  $R_{\text{krit}} = 1 * R_{\text{krit}} = 0,035$ , wobei  $R_{\text{krit}}$  die normale kritische Korrelation ist, der Vorfaktor von acht schrittweise auf den Wert 1 halbiert:

$$R_{\text{krit}} = 8 * R_{\text{krit}} = 0.280$$

| MV  | SD  | r(Pd) | R_Res | Name  | dRVI  | Co   | Wgt | Ctr |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|------|-----|-----|
| 8.3 | 9.0 | 0.97  | 0.97  | Georg | 93.94 | 0.98 | 100 | 94  |

**Abb. 4.3:** *Moses-Vorhersagegleichung im Standard-Tabellenformat. Beispielgleichung beider Vorhersagetage für den Turnierstandort Innsbruck. Prediktand TTm (Höchsttemperatur in Moses-internen Einheiten von 06 UTC bis 18 UTC). Künstlich heraufgesetztes Abbruchkriterium.*

In Abbildung 4.3 bricht die Regressionsgleichung bereits nach dem ersten Regressions-schritt ab, sodass lediglich *Georg* den erklärenden Prediktor stellt. Die modifizierte kritische Korrelation ist so hoch gewählt, dass sämtliche weiteren potentiellen Prediktoren bereits das Abbruchkriterium erfüllen und nicht mit in die Regressionsgleichung aufgenommen werden. Diese *Moses*-Vorhersagegleichung mit *Georg* als einzigem Prediktor mag etwas willkürlich wirken, da sich *Moses* mit einem Gewicht von 100% auf *Georg* verlässt und streng genommen kein gewichtetes Mittelungsverfahren mehr darstellt. Jedoch zeigt sich häufig, dass, besonders am Turnierstandort Innsbruck, zu viele Prediktoren neben *Georg* die Prognose verschlechtern, weil die Regressionsgleichung ins statistische Overfitting gesteuert wird.

$$R_{\text{krit}} = 4 * R_{\text{krit}} = 0.140$$

| MV  | SD  | r(Pd) | R_Res | Name  | dRVI  | Co   | Wgt | Ctr |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|------|-----|-----|
| 8.3 | 9.0 | 0.97  | 0.97  | Georg | 93.94 | 0.52 | 53  | 50  |
| 8.4 | 8.6 | 0.96  | 0.25  | Enova | 4.26  | 0.21 | 21  | 19  |
| 8.2 | 8.9 | 0.97  | 0.17  | nik   | 0.79  | 0.26 | 27  | 25  |

**Abb. 4.4:** *Moses-Vorhersagegleichung im Standard-Tabellenformat. Beispielgleichung beider Vorhersagetage für den Turnierstandort Innsbruck. Prediktand TTm (Höchsttemperatur in Moses-internen Einheiten von 06 UTC bis 18 UTC). Künstlich heraufgesetztes Abbruchkriterium.*

In der Abbildung 4.4 lässt eine halb so hohe modifizierte kritische Korrelation 2 weitere Regressionsschritte zu. Der Prediktor *Enova* reduziert in einem ersten Regressionsschritt die nach *Georg* verbliebene Erwartung der Fehlervarianz an unabhängigen Daten nochmals um 4,26% und geht mit einem Gewicht von 21% in die Vorhersage ein. Anschließend sorgt der Prediktor *nik* für eine weitere Reduktion von der nach *Enova* verbliebenen Erwartung der Fehlervarianz von 0,79%. Weitere potentielle Prediktoren weisen eine Korrelation zum Residuum auf, die kleiner als die kritische Korrelation ist, sodass die Regressionsgleichung an der Stelle finalisiert ist.

$$R_{\text{krit}} = 2 \cdot R_{\text{krit}} = 0.070$$

| MV  | SD  | r(Pd) | R_Res | Name       | dRVI  | Co   | Wgt | Ctr |
|-----|-----|-------|-------|------------|-------|------|-----|-----|
| 8.3 | 9.0 | 0.97  | 0.97  | Georg      | 93.94 | 0.43 | 43  | 41  |
| 8.4 | 8.6 | 0.96  | 0.25  | Enova      | 5.78  | 0.02 | 2   | 2   |
| 8.2 | 8.9 | 0.97  | 0.17  | nik        | 2.35  | 0.15 | 15  | 14  |
| 8.1 | 8.9 | 0.96  | 0.16  | DWD-MOSMix | 0.65  | 0.12 | 12  | 11  |
| 8.4 | 9.0 | 0.95  | 0.09  | David      | 0.31  | 0.09 | 9   | 9   |
| 7.8 | 9.0 | 0.94  | 0.08  | HELMUT     | 0.28  | 0.08 | 9   | 8   |
| 8.6 | 8.6 | 0.95  | 0.07  | Eugenia    | 0.32  | 0.11 | 11  | 10  |

**Abb. 4.5:** Moses-Vorhersagegleichung im Standard-Tabellenformat. Beispielgleichung beider Vorhersagetage für den Turnierstandort Innsbruck. Prediktand TTm (Höchsttemperatur in Moses-internen Einheiten von 06 UTC bis 18 UTC). Künstlich heraufgesetztes Abbruchkriterium.

Mit einem Vorfaktor der kritischen Korrelation von 2 zeigt die Regressionsgleichung schon ein ähnliches Verhalten wie die Original-Moses-Vorhersagegleichung (siehe Abb.: 4.1). Diese modifizierte kritische Korrelation lässt nach *Georg* sechs weitere Regressionsschritte zu.

## 5 Ergebnis und Auswertung

In den nachfolgend aufgeführten Tabellen werden die mittleren Punktdifferenzen je Einzelvorhersage der in Kapitel 4 vorgestellten 16 Moses-Kombinationen im Vergleich zum operationellen Moses aufgezeigt. Als Referenz ist der operationelle Moses bei Variante 3 mit einem Vorfaktor der kritischen Korrelation von 1,00

zu finden. Aus Übersichtlichkeitsgründen ist die Einheit in 1/1000 Punkten je Einzelvorhersage angegeben. Die Farbgebung wurde ausgehend von der Differenz zum *Moses* mit der operationellen Kombination aus Variante 3 und Faktor 1 gewählt: Eine grünliche Färbung, sowohl der Box als auch des Werts zeigt eine Verbesserung, weiß das gleiche Ergebnis und eine rötliche Färbung eine Verschlechterung.

| Turnierstandort Berlin |            |            |            |            |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Faktor                 | Variante 1 | Variante 2 | Variante 3 | Variante 4 |
| 0.50                   | 19         | 8          | -4         | -86        |
| 0.70                   | 17         | 9          | 1          | -46        |
| 1.00                   | 14         | 8          | 0          | -35        |
| 1.40                   | 16         | 9          | -20        | -43        |

**Abb. 5.1:** Ergebnis der insgesamt 16 *Moses*-Kombinationen für den Turnierstandort Berlin in 1/1000 Punkten je Einzelvorhersage gegenüber dem operationellen *Moses*.

Zunächst ist zu erwähnen, dass der hier untersuchte *Moses* sich vom operationellen *Moses* in folgenden Kriterien unterscheidet: Zunächst wurde eine geänderte Turniermetrik eingeführt, sowie ein geändertes Auswahlverfahren der Prediktoren implementiert. Des Weiteren wurde die Vorhersage des Prediktanden  $dd$  sowie des signifikanten Wetters  $Wv$  und  $Wn$  angepasst. Eine genauere Beschreibung dieser Änderungen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Auf dieser Grundlage wird die Kombination aus dem Faktor 1,00 und der Variante 3 im Folgenden quasi-operationeller *Moses* genannt. Für den Turnierstandort Berlin zeigt sich ganz klar eine abnehmende Performance bei zunehmender Anzahl der Regressionsgleichungen. Die Variante 1 mit lediglich einer erklärenden Gleichung und Variante 2 mit zwei Regressionsgleichungen erzeugt bei jedem Vorfaktor eine Verbesserung gegenüber dem operationellen *Moses*. Bei der Variante 3 kann lediglich der etwas niedrigere Faktor 0,70 die operationelle *Moses*-Variante um 1/1000 Punkt je Einzelvorhersage verbessern. Die *Moses*-Kombinationen mit der Variante 4 hingegen würden den derzeitigen Turnier-*Moses* deutlich verschlechtern. Je weniger Gleichungen, desto besser. Der Einfluss der modifi-

zierten kritischen Korrelation ist im Vergleich zum Einfluss der Anzahl der Regressionsgleichungen geringer ausgeprägt. Bei der augenscheinlich besten Variante 1 deutet sich eine Performancesteigerung an, je geringer der Vorfaktor der kritischen Korrelation ausfällt, sprich je mehr Prediktoren in der Gleichung enthalten sind. Da lediglich eine Regressionsgleichung verwendet, liegt die Vermutung nahe, dass weitere zugelassene Prediktoren der Gleichung Stabilität verleihen. Im Gegensatz dazu ist bei Variante 4 eine Dämpfung der Verschlechterung durch hohe Faktoren zu vernehmen. Aufgrund der leicht blasseren Einfärbung der *Moses*-Kombinationen mit Variante 2 ist der Einfluss des Faktors am geringsten, während der Einfluss bei Variante 4, durch das intensive Rot am deutlichsten ausgeprägt ist. Dort liegen die Punktverluste im Vergleich zum operationellen *Moses* zwischen -35/1000 bis sogar -86/1000 Punkte je Einzelvorhersage.

| Turnierstandort Leipzig |            |            |            |            |
|-------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Faktor                  | Variante 1 | Variante 2 | Variante 3 | Variante 4 |
| 0.50                    | 24         | 15         | 8          | -12        |
| 0.70                    | 28         | 21         | 10         | -5         |
| 1.00                    | 30         | 32         | 0          | -11        |
| 1.40                    | 34         | 32         | -7         | -20        |

**Abb. 5.2:** Ergebnis der 16 *Moses*-Kombinationen für den Turnierstandort Leipzig in 1/1000 Punkten je Einzelvorhersage gegenüber dem operationellen *Moses*.

An der etwas intensiveren Farbgebung, des grünlichen Bereichs bei dem Turnierstandort Leipzig, zeigt sich, dass die Verbesserungen stärker ausfallen. Die Punktverluste halten sich jedoch in Grenzen. Dennoch zeigt sich ein ähnliches Bild der Performance. Insgesamt 10 der 16 *Moses*-Kombinationen würden bei einer Umstellung den operationellen *Moses* verbessern. Erneut zeigt sich eine Performanceabnahme bei zunehmender Anzahl an Regressionsgleichungen. In Abbildung 5.2 entsteht der Eindruck, dass der Einfluss des Faktors bei jeder *Moses*-Variante in etwa gleich ausfällt. Die Variante 1 in Leipzig erzielt, im Gegensatz zur Variante 1 in Berlin, eine größere Verbesserung je höher der Faktor gewählt wird. Das bedeutet, dass das Optimum in Leipzig bei einer Regressionsgleichung in Kombination mit wenig Prediktoren liegt. Bei der Variante 4, die im

Vergleich zum operationellen *Moses* erneut die größten Verschlechterungen erzeugt, verschlechtert eine hohe kritische Korrelation die Performance weiter.

| Turnierstandort Wien |            |            |            |            |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|
| Faktor               | Variante 1 | Variante 2 | Variante 3 | Variante 4 |
| 0.50                 | 26         | 19         | -5         | -101       |
| 0.70                 | 25         | 20         | 1          | -88        |
| 1.00                 | 21         | 19         | 0          | -43        |
| 1.40                 | 12         | 4          | -21        | -51        |

**Abb. 5.3:** Ergebnis der 16 *Moses*-Kombinationen für den Turnierstandort Wien in 1/1000 Punkten je Einzelvorhersage gegenüber dem operationellen *Moses*.

Bei dem Turnierstandort Wien zeigt sich, dass die *Moses*-Kombinationen mit einer beziehungsweise zwei Gleichungen den operationellen *Moses* bei jedem Faktor verbessern. Die Variante 3 mit insgesamt 12 Regressionsgleichungen erzeugt, ähnlich wie in den bereits beschriebenen Turnierstandorten Berlin und Leipzig ein gemischtes Ergebnis. Bei der Variante 4, bestehend aus 24 Regressionsgleichungen, werden in Kombination mit jedem Faktor erneut die schlechtesten Ergebnisse erzeugt. Ausgehend von dem operationellen *Moses* hat sich die Performance bei abnehmender Anzahl der Regressionsgleichungen stark verbessert und bei zunehmender Anzahl der Regressionsgleichungen am deutlichsten verschlechtert. Von den insgesamt 16 *Moses*-Kombinationen verbessern 9 Kombinationen den operationellen *Moses*. Ähnlich wie bei den Turnierstandorten zuvor ist in Wien der Einfluss des Faktors im Vergleich zum Einfluss der Anzahl der Regressionsgleichungen geringer ausgeprägt. Im Hinblick auf eine abnehmende Anzahl an Regressionsgleichungen werden die Verbesserungen größer, je kleiner der Faktor der kritischen Korrelation wird, desto mehr Prediktoren demzufolge zugelassen werden. Nimmt die Anzahl der Regressionsgleichungen hingegen zu, werden die Punktverluste bei größerem Faktor und entsprechend mehr Prediktoren in den Gleichungen größer.

| Turnierstandort Zürich |            |            |            |            |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Faktor                 | Variante 1 | Variante 2 | Variante 3 | Variante 4 |
| 0.50                   | 22         | 20         | 5          | -8         |
| 0.70                   | 22         | 21         | 7          | -11        |
| 1.00                   | 24         | 22         | 0          | -15        |
| 1.40                   | 26         | 18         | -11        | -28        |

**Abb. 5.4:** Ergebnis der 16 Moses-Kombinationen für den Turnierstandort Zürich in 1/1000 Punkten je Einzelvorhersage gegenüber dem operationellen Moses.

Bei der Turnierstadt Zürich zeigt sich, ähnlich wie in den bereits beschriebenen Turnierstandorten, das gleiche Ergebnis. Die ersten beiden Varianten mit lediglich einer beziehungsweise zwei Regressionsgleichungen verzeichnen deutliche Performancesteigerungen. Bei jedem Faktor der kritischen Korrelation werden teils mehr als 20/1000 Punkte gegenüber dem operationellen Moses herausgeholt. Auch die Variante 3 liefert, ausgenommen bei dem Faktor von 1,40, der die meisten Prediktoren je Regressionsgleichung zulässt, Verbesserungen gegenüber dem operationellen Moses. Erneut verschlechtern sämtliche Kombinationen der Variante 4 im Vergleich zum operationellen Moses die Performance. Hier ist jedoch noch anzumerken, dass sich, im Vergleich zu den bereits beschriebenen Turnierstandorten, die Verschlechterung mit höchstens -28 Punkten in Grenzen hält. Das Optimum der Vorhersagbarkeit wird in Zürich bei einer Kombination aus Variante 1 mit einem Faktor von 1,40 erreicht.

| Turnierstandort Innsbruck |            |            |            |            |
|---------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Faktor                    | Variante 1 | Variante 2 | Variante 3 | Variante 4 |
| 0.50                      | 32         | 26         | 19         | -5         |
| 0.70                      | 33         | 27         | 14         | -9         |
| 1.00                      | 36         | 27         | 0          | -23        |
| 1.40                      | 31         | 23         | -10        | -40        |

**Abb. 5.5:** Ergebnis der 16 Moses-Kombinationen für den Turnierstandort Innsbruck in 1/1000 Punkten je Einzelvorhersage gegenüber dem operationellen Moses.

Der Turnierstandort Innsbruck ist noch einmal gesondert hervorzuheben, da die starke orographische Prägung einen recht großen Einfluss auf das Wetter nehmen kann. Deshalb liegen die mittleren Punktverluste im Turnierbetrieb häufig über denen der anderen Turnierstandorte. Auch hier zeigt sich jedoch ein ähnliches Bild. Sowohl die Variante 1 als auch die Variante 2 sorgen für eine erhebliche Performancesteigerung bei jedem Faktor. An dieser Stelle wird noch einmal bestätigt, dass je geringer die Anzahl an Regressionsgleichungen gewählt wird, desto größer werden die Verbesserungen im Vergleich zum operationellen *Moses*. Bei der Variante 3 mit 12 Regressionsgleichungen für die 12 Einzelvorhersagen werden ausgehend von der operationellen *Moses*-Variante Verbesserungen bei kleineren Faktoren und Punktverluste bei dem größeren Faktor erzielt. Die Variante 4, die mit 24 Regressionsgleichungen für die 24 Einzelvorhersagen am deutlichsten differenziert, zeigt erneut eine Verschlechterung der Performance. Je größer der Faktor gewählt wird, sprich desto mehr Prediktoren in den Regressionsgleichungen zugelassen werden, desto größer werden die Punktverluste. Der Einfluss des Faktors ist bei den *Moses*-Kombinationen mit den leichten Verbesserungen lediglich gering ausgeprägt, kann jedoch bei den Kombinationen, die die Performance verschlechtern einen verstärkenden Charakter annehmen. Je höher der Faktor bei der Variante 4 gewählt ist, desto weitreichender die Punktverluste.

Rechnet man die 36/1000 Punktgewinn je Einzelvorhersage auf allen Vorhersagen des operationellen *Moses* der letzten 10 Jahre hoch, ergibt sich, dass *Moses* im Mittel etwas besser ist als *Georg*. Damit ist eine wichtige Intention dieser Arbeit zum Erfolg geführt worden: Der operationelle *Moses* wird auf Variante 1 umgestellt, wonach erwartet werden kann, dass es in Zukunft besser sein wird als der beste Teilnehmer.

Um nun aus den Ergebnissen der quasi-operationellen *Moses*-Varianten, speziell für die einzelnen Turnierstandorte, die *Moses*-Kombination herauszufinden die in der Gesamtheit gesehen die größte Verbesserung zeigt, wurde schlicht jede der

16 Moses-Kombinationen über alle Städte gemittelt. Das Ergebnis ist der folgenden Abb. 5.6 zu entnehmen:

| Alle Turnierstandorte (gemittelt) |            |            |            |            |
|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Faktor                            | Variante 1 | Variante 2 | Variante 3 | Variante 4 |
| 0.50                              | 24         | 17         | 4          | -43        |
| 0.70                              | 25         | 19         | 6          | -32        |
| 1.00                              | 25         | 21         | 0          | -26        |
| 1.40                              | 23         | 17         | -14        | -37        |

**Abb. 5.6:** Ergebnis der 16 Moses-Kombinationen über alle Turnierstandorte gemittelt in 1/1000 Punkten je Einzelvorhersage gegenüber dem operationellen Moses.

Wie sich bereits in den vorherigen Abbildungen gezeigt hat, ist die Performance des quasi-operationellen Moses im Vergleich zum operationellen Moses stark von der Anzahl der Regressionsgleichungen abhängig. Sowohl die Moses-Variante 1 mit einer Regressionsgleichung als auch die Moses-Variante 2 mit zwei Regressionsgleichungen weist im Vergleich zum operationellen Moses eine teils zweistellige Performancesteigerung auf. Hin zu einer geringeren Anzahl an Regressionsgleichungen sind die Verbesserungen größer. Das Optimum der Vorhersagbarkeit liegt hierbei offensichtlich bei der Kombination aus dem Faktor 1,00 und Variante 1 beziehungsweise Variante 2. Die Moses-Variante 3 kann höchstens bei recht vielen zugelassenen Prediktoren eine leichte einstellige Performancesteigerung vorweisen. Bei der Moses-Variante 4 lässt eine Kombination aus 24 Regressionsgleichungen mit jeglichem Faktor die Prognose deutlich ins statistische Overfitting driften. Das Optimum hierbei wäre die Kombination mit dem Faktor 1,00, da sich die Performance hin zu einer größeren Anzahl an zugelassenen Prediktoren als auch hin zu einer geringeren Anzahl an zugelassenen Prediktoren weiter verschlechtert. Wie auch in den Tabellen zuvor, ist der Einfluss der modifizierten kritischen Korrelation gegenüber dem Einfluss der Anzahl der Regressionsgleichungen jedoch gering ausgeprägt.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit wurde eine quasi-operationelle Version des statistischen Vorhersageverfahrens *Moses* von METEO SERVICE weather research GmbH vorgestellt, analysiert und verbessert. Dazu wurde zunächst ein Einblick in das Berliner Wetterturnier als Vorhersageplattform gegeben. Um die Funktionsweise von *Moses* analysieren zu können, wurde die MOS-Methodik sowie der Regressionsalgorithmus vorgestellt. Im zweiten Teil dieser Bachelorarbeit wurde auf das statistische Problem des Overfittings eingegangen, das mit Hilfe der im Anschluss eingeführten kritischen Korrelation behandelt wird. Zum besseren Verständnis ist auch in verkürzter Form auf die Kenngrößen einer typischen MOS-Prognosegleichung eingegangen worden.

Um den *Moses* in einer quasi-operationellen Version zu verbessern, wurden die letzten zwei Jahre des unabhängigen Datensatzes durchlaufen und sowohl die Anzahl der Regressionsgleichungen als auch der Faktor der kritischen Korrelation variiert. Aus den daraus resultierenden insgesamt 16 *Moses*-Experimenten wurde anschließend nach derjenigen Kombination gesucht, die, gemessen, sowohl an allen fünf Turnierstädten als auch einzeln betrachtet, im Vergleich zum operationellen *Moses*, die größten Verbesserungen erzielt. Die Variante 1 des quasi-operationellen *Moses* mit nur einer Regressionsgleichung für alle Wetterelemente und Samstag und Sonntag zusammen erzeugt mit Abstand die im Vergleich zum operationellen *Moses*, größten Verbesserungen. Besonders in Leipzig und Innsbruck würde eine Umstellung auf die *Moses*-Kombinationen mit lediglich einer Regressionsgleichung und jedem Faktor den operationellen *Moses* teils mehr als 30/1000 Punkte je Einzelvorhersage verbessern. Auch in den anderen Städten Berlin, Wien und Zürich liegt das Optimum der Vorhersagbarkeit bei der *Moses*-Kombination mit der Variante 1. Je weniger Regressionsgleichungen verwendet werden, desto besser ist die Performance. Im Hinblick auf die beste *Moses*-Variante 1 liegt das offenbar breite Optimum die dem Faktor von etwa 1 bis 1,4. Ein geringerer Faktor mit dementsprechend mehr zugelassenen

Prediktoren verschlechtert die Performance leicht. Auch ein höherer Faktor, stellvertretend für einen frühen Regressionsabbruch erzielt eine etwas schlechtere Performance.

Als Auswirkung dieser experimentellen Ergebnisse erfolgt eine Umstellung der operationellen Moses-Version auf die erfolgreichere Moses-Kombination (Variante 1 mit Faktor 1,00).

# Anhang

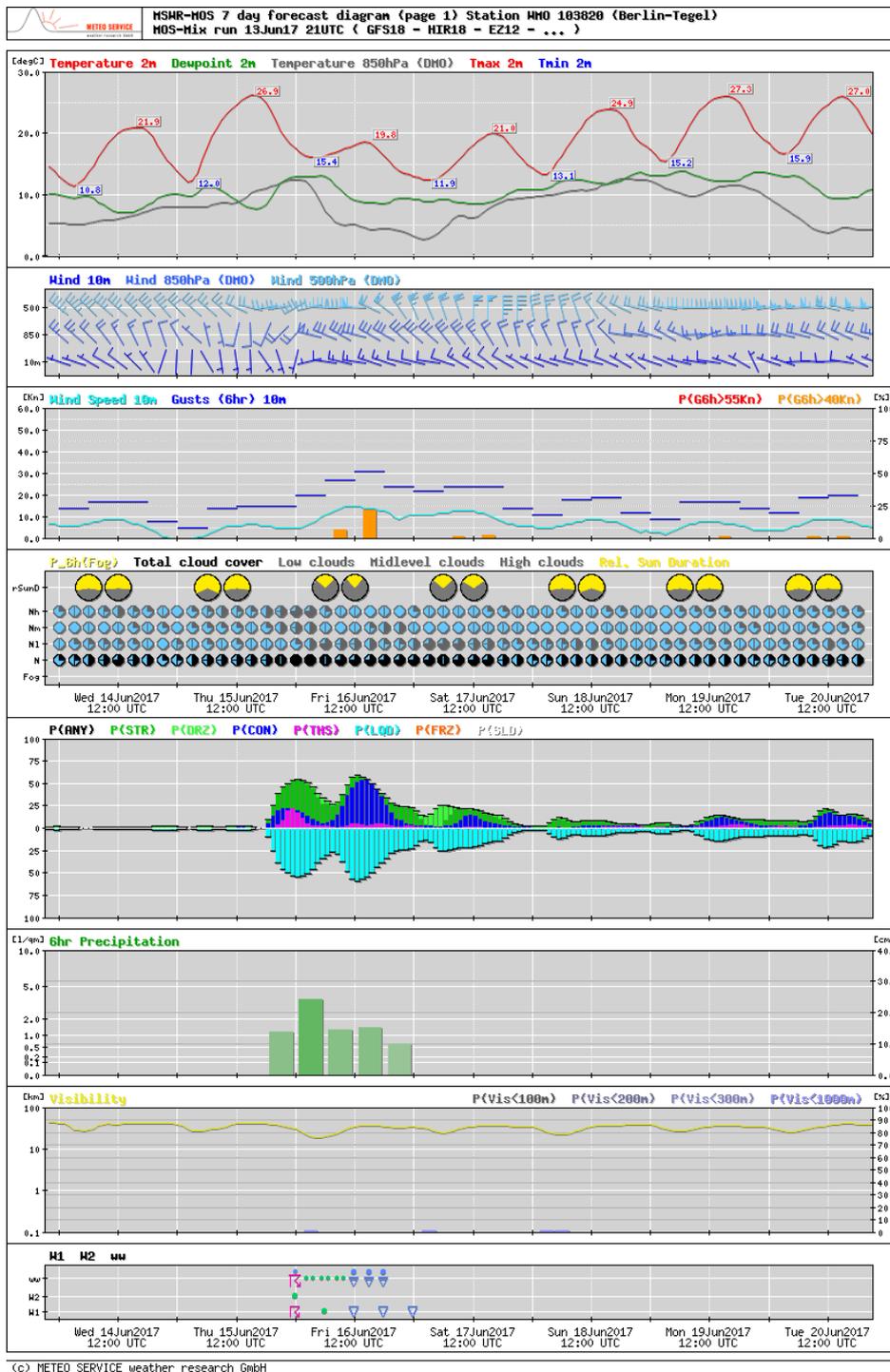
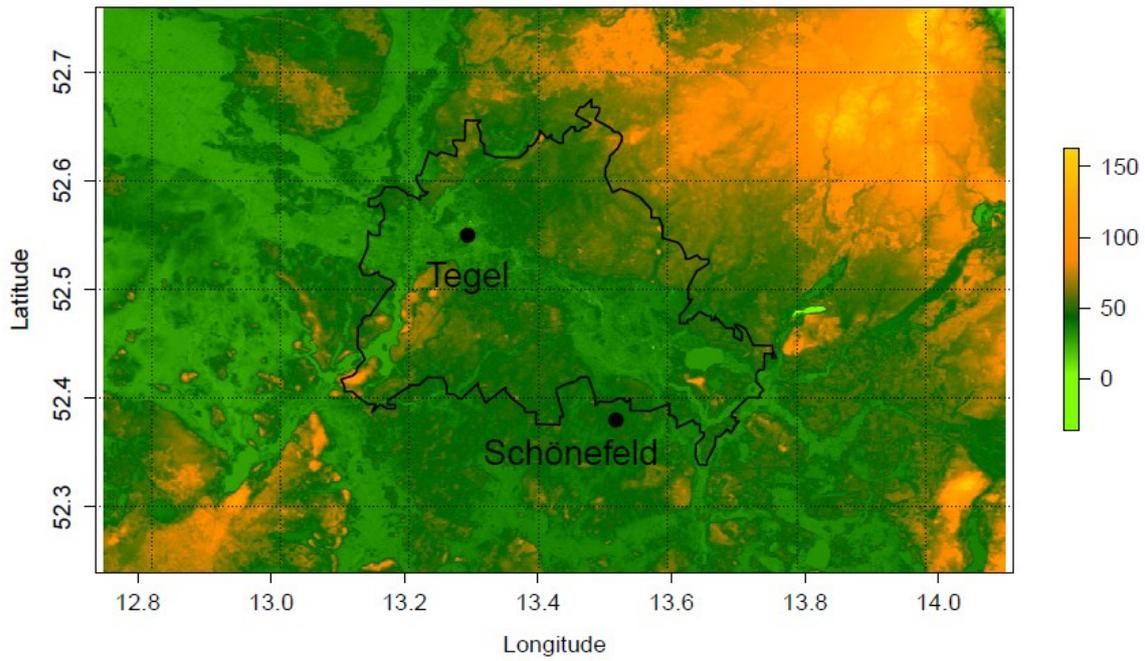
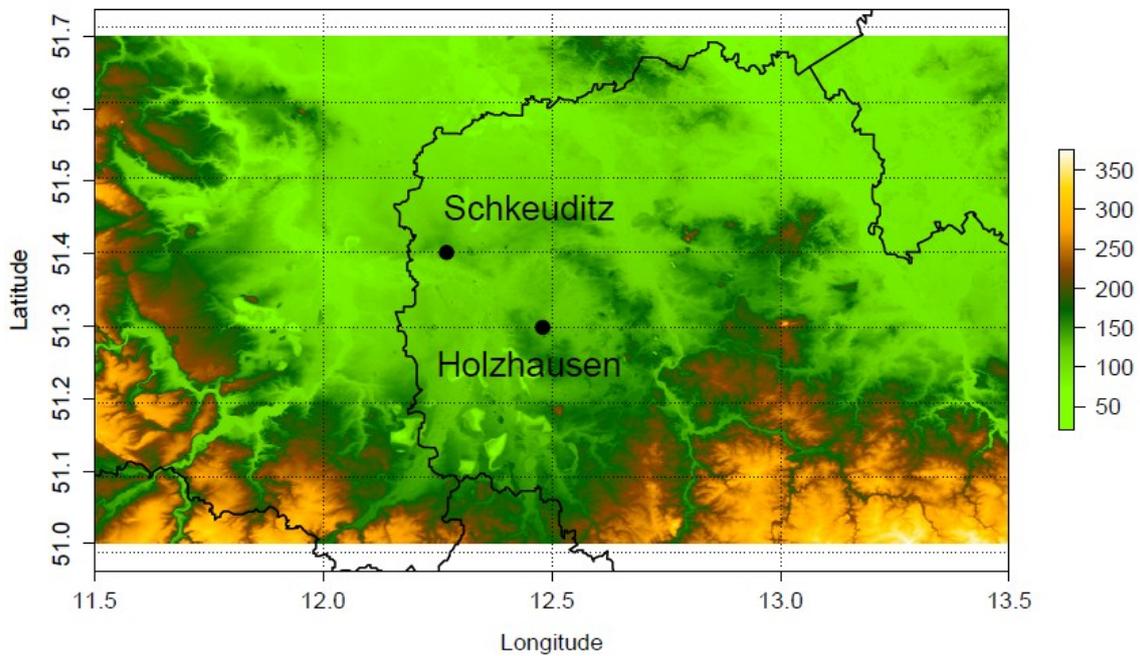


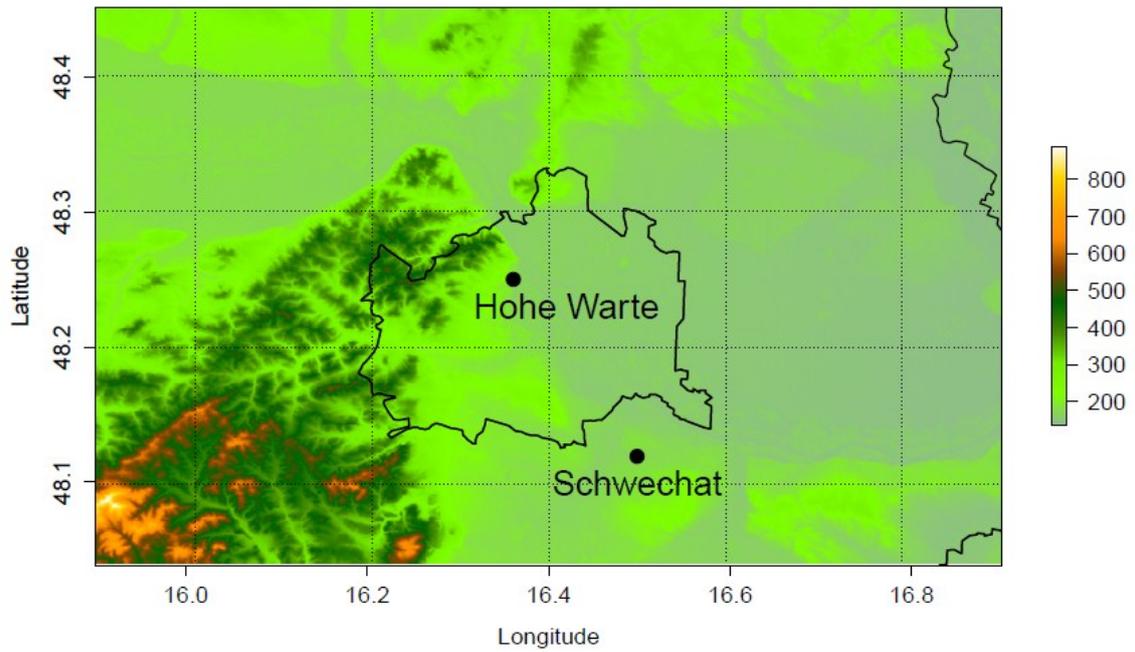
Abb. A.1: MOS-Stationsdiagramm für die Station Berlin-Tegel (WMO 10380), Ausgabe vom 13.06.2017 21 UTC, basierend auf GFS-, HIR-, EZ-Modelldaten [MSwr, 2017]



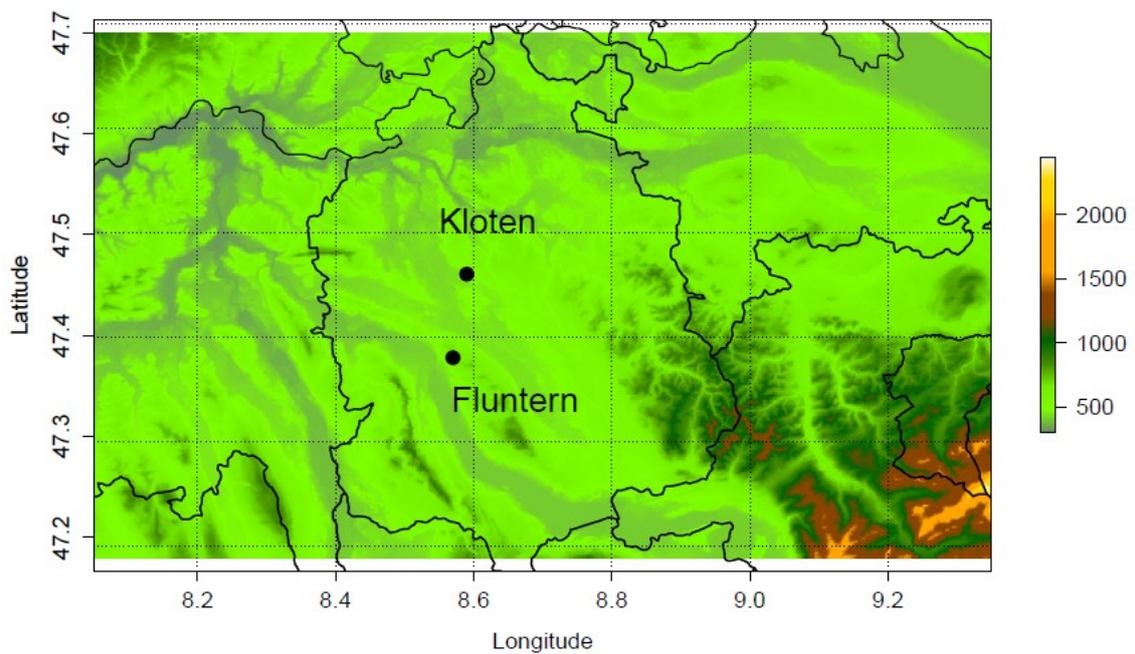
**Abb. A.2:** Orographische Karte von Berlin und Umgebung mit den beiden Referenzstationen Tegel (37m ü. NN) und Schönefeld (47m ü. NN). Geplottet mit der Programmierumgebung R, Einheit in Höhenmeter.



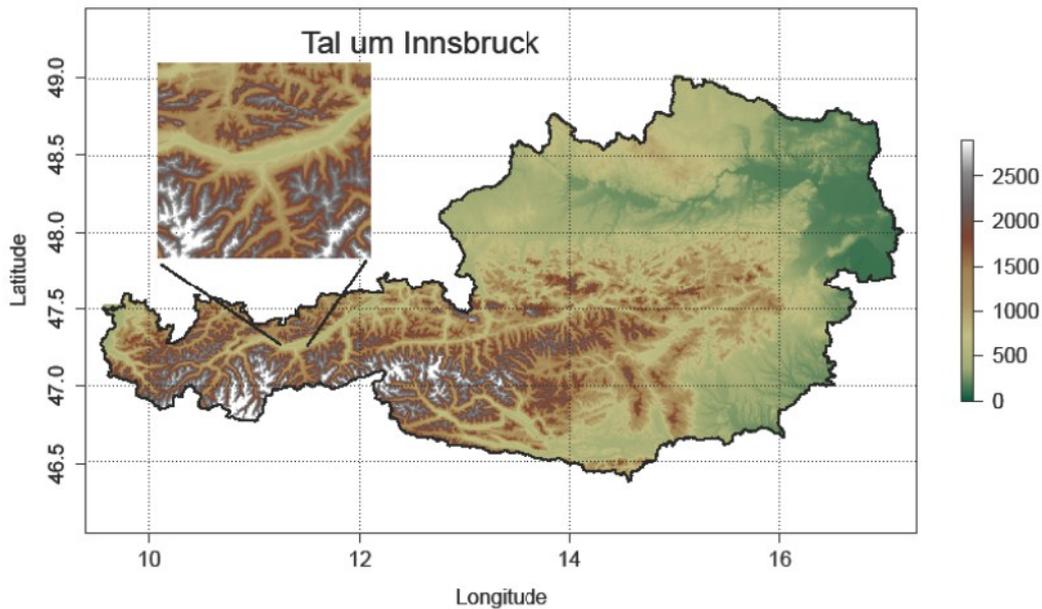
**Abb. A.3:** Orographische Karte von Leipzig und Umgebung mit den beiden Referenzstationen Schkeuditz (113m ü. NN) und Holzhausen (138m ü. NN). Geplottet mit der Programmierumgebung R, Einheit in Höhenmeter.



**Abb.A.4:** Orographische Karte von Wien und Umgebung mit den beiden Referenzstationen Hohe Warte und Schwechat. Geplottet mit der Programmierumgebung R, Einheit in Höhenmeter.



**Abb. A.5:** Orographische Karte von Zürich und Umgebung mit den beiden Referenzstationen Fluntern und Kloten. Geplottet mit der Programmierumgebung R, Einheit in Höhenmeter.



**Abb. A.6:** Orographische Karte von Österreich. Zoom in das Tal um Innsbruck. Geplottet mit der Programmierung R, Einheit in Höhenmeter.

## Literaturverzeichnis

Arrit, R.W., Frank, W.M., 1985: Experiments in probability of Precipitation Amount Forecasting Using Model Output Statistics. *Mon. Weather Rev.* **113**, 1837-1851

Burrows, W.R., 1985: On the Use of Time-Offset Model Output Statistics for Production of Surface Wind Forecasts. *Monthly Weather Review* **113**, 2049-2054

Carr, M. B., 1988: Determining the optimum number of predictors for a linear prediction equation. *Monthly Weather Review* **116**, 1623-1640

Carter, G.M., Glahn, H.R., 1976: Objective prediction of cloud amount based on model output statistics. *Monthly Weather Review* **104**, 1565-1572

Dehner, K.-H., 2013: *Verifikationsbericht zur Güte lokaler Wettervorhersagen*. Nr. **48**, Geschäftsbereich Wettervorhersage, Deutscher Wetterdienst

Föst, F., 2006: *Eine objektive Föhnklimatologie für das Wipp- und Inntal*, Diplomarbeit, Freie Universität Berlin

Glahn, H.R., Lowry, D.A., 1972: The Use of Model Output Statistics (MOS) in Objective Weather Forecasting, *Journal of Applied Meteorology* **11**, 1203-1211

Göber, M., 2007: *Verifikationsbericht zur Güte lokaler Wettervorhersagen*. Nr. **35**, Geschäftsbereich Wettervorhersage, Deutscher Wetterdienst

Göber, M., 2007: *Verifikationsbericht zur Güte lokaler Wettervorhersagen*. Nr. **36**, Geschäftsbereich Wettervorhersage, Deutscher Wetterdienst

Haas, G., 2006: *Nordföhn und Niederschlag in Innsbruck*, Diplomarbeit, Universität Innsbruck

Hoffmann, J., 2008: *Entwicklung und Anwendung von statistischen Vorhersage-Interpretationsverfahren für Gewitternowcasting und Unwetterwarnungen unter Einbeziehung von Fernerkundungsdaten*, Dissertation, Freie Universität Berlin

Kapp, F., 2015: *Erfassung und statistische Auswertung von Wettetipp-Vorhersagen zur Ensemble- und MOS-Erzeugung*, Bachelorarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Klein, W.H., Glahn, H.R., 1974: Forecasting Local Weather by Means of Model Output Statistics. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **55**, 1217-1227

Knüpfner, K., 1996: Methodical and predictability aspects of MOS systems. Preprints, *13th Conf. On Probability and Statistics in Atmosph. Sciences*, San Francisco, CA, Amer. Meteor. Soc., 190-197.

Leyendecker, V., 2007: *Weiterentwicklung eines GFS/MOS-Systems unter Einbeziehung von Beobachtungsdaten zur Verbesserung der Kurzfristvorhersage*, Diplomarbeit, Universität Bonn

METEO SERVICE weather research GmbH, 2016: <http://www.mswr.de>, 05/2017

Neubarth, G., 2015: *15 Jahre Berliner Wetterturnier: Verifikation mit Schwerpunkt auf seltene Wetterereignisse sowie die zeitliche Entwicklung der Prognosequalität unter Berücksichtigung der Vorhersageunsicherheit*, Diplomarbeit, Freie Universität Berlin

Schönwiese, C.-D., 2013: *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*, **5. Auflage**, Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Germany, **ISBN 978-3-443-01069-0**

Walter, A., S. Trepte und R. Thehos, 2009: Statistische Vorhersage- und Warnverfahren: MOS-Mix, WarnMOS, BlitzMOS und CellMOS. *promet* **35**.1-3, 70-77

Wetterturnier Berlin, 2017: <http://www.wetterturnier.de/regeln.php>, 04/2017

Wetterturnier Berlin, 2017: <http://www.wetterturnier.de/verfahren.php>, 05/2017

Wilks, D.S., 2011: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, **3. Auflage**, Elsevier Inc., **ISBN 978-0-12-385022-5**

## Abbildungsverzeichnis

**Abb. 2.1:** Übersicht der Turnierstandorte mit dem jeweiligen Startdatum, sowie den mit der WMO-Kennung versehenen Referenzstationen.

**Abb. 2.2:** Auflistung sämtlicher Wetterelemente, im weiteren Verlauf auch Prediktanden, für jeweils Samstag und Sonntag beim Berliner Wetterturnier. Dazu gehören die Elementkürzel, sowie erreichbare Punktzahl. Einteilung in Punkt- und Intervallsprognosen.

**Abb. 4.1:** Moses-Vorhersagegleichung im Standard-Tabellenformat. Beispielgleichung beider Vorhersagetage für den Turnierstandort Innsbruck, Prediktand TTm (Höchsttemperatur in Moses-internen Einheiten von 06 UTC bis 18 UTC)

**Abb. 4.2:** Übersicht über die vier Moses-Varianten mit der zuvor bereits beschriebenen Unterteilung in Vorhersagetag und/oder Wetterelement sowie der entsprechenden Anzahl an verwendeten Prediktoren, Moses-Vorhersage für Innsbruck am 30.10.2015 und am 28.10.2016.

**Abb. 4.3:** Moses-Vorhersagegleichung im Standard-Tabellenformat. Beispielgleichung beider Vorhersagetage für den Turnierstandort Innsbruck. Prediktand TTm (Höchsttemperatur in Moses-internen Einheiten von 06 UTC bis 18 UTC). Künstlich heraufgesetztes Abbruchkriterium.

**Abb. 4.4:** Moses-Vorhersagegleichung im Standard-Tabellenformat. Beispielgleichung beider Vorhersagetage für den Turnierstandort Innsbruck. Prediktand TTm (Höchsttemperatur in Moses-internen Einheiten von 06 UTC bis 18 UTC). Künstlich heraufgesetztes Abbruchkriterium.

**Abb. 4.5:** Moses-Vorhersagegleichung im Standard-Tabellenformat. Beispielgleichung beider Vorhersagetage für den Turnierstandort Innsbruck. Prediktand TTm (Höchsttemperatur in Moses-internen Einheiten von 06 UTC bis 18 UTC). Künstlich heraufgesetztes Abbruchkriterium.

**Abb. 5.1:** Ergebnis der insgesamt 16 Moses-Kombinationen für den Turnierstandort Berlin in 1/1000 Punkten je Einzelvorhersage gegenüber dem operativen Moses.

**Abb. 5.2:** *Ergebnis der 16 Moses-Kombinationen für den Turnierstandort Leipzig in 1/1000 Punkten je Einzelvorhersage gegenüber dem operationellen Moses.*

**Abb. 5.3:** *Ergebnis der 16 Moses-Kombinationen für den Turnierstandort Wien in 1/1000 Punkten je Einzelvorhersage gegenüber dem operationellen Moses.*

**Abb. 5.4:** *Ergebnis der 16 Moses-Kombinationen für den Turnierstandort Zürich in 1/1000 Punkten je Einzelvorhersage gegenüber dem operationellen Moses.*

**Abb. 5.5:** *Ergebnis der 16 Moses-Kombinationen für den Turnierstandort Innsbruck in 1/1000 Punkten je Einzelvorhersage gegenüber dem operationellen Moses.*

**Abb. 5.6:** *Ergebnis der 16 Moses-Kombinationen über alle Turnierstandorte gemittelt in 1/1000 Punkten je Einzelvorhersage gegenüber dem operationellen Moses.*

**Abb. A.1:** *MOS-Stationsdiagramm für die Station Berlin-Tegel (WMO 10380), Ausgabe vom 13.06.2017 21 UTC, basierend auf GFS-, HIR-, EZ-Modelldaten [MSwr, 2017]*

**Abb. A.2:** *Orographische Karte von Berlin und Umgebung mit den beiden Referenzstationen Tegel (37m ü. NN) und Schönefeld (47m ü. NN). Geplottet mit der Programmierumgebung R, Einheit in Höhenmeter.*

**Abb. A.3:** *Orographische Karte von Leipzig und Umgebung mit den beiden Referenzstationen Schkeuditz (113m ü. NN) und Holzhausen (138m ü. NN). Geplottet mit der Programmierumgebung R, Einheit in Höhenmeter.*

**Abb.A.4:** Orographische Karte von Wien und Umgebung mit den beiden Referenzstationen Hohe Warte und Schwechat. Geplottet mit der Programmierumgebung R, Einheit in Höhenmeter

**Abb. A.5:** Orographische Karte von Zürich und Umgebung mit den beiden Referenzstationen Fluntern und Kloten. Geplottet mit der Programmierumgebung R, Einheit in Höhenmete

**Abb. A.6:** Orographische Karte von Österreich. Zoom in das Tal um Innsbruck. Geplottet mit der Programmierumgebung R, Einheit in Höhenmeter.

## Abkürzungsverzeichnis

|         |  |
|---------|--|
| a       | Konstante  |
| b       | Steigung   |
| $c_i$   | Koeffizienten der <i>Screening Regression</i>                              |
| Co      | Regressionskoeffizient   |
| Const.  | Regressionskonstante der Gleichung   |
| Ctr     | Beitrag (engl. <i>Contribution</i> ): RV-normiertes Beitragsmaß            |
| dd      | Windrichtung   |
| dRV     | Erwartete RV (Reduktion der Fehlervarianz) durch Hinzunahme des Prediktors |
| dRVI    | Erwartete RV durch Hinzunahme des Prediktors an unabhängigen Daten         |
| $e_i$   | <i>Residuen</i> bzw. Fehler  |
| E(RMSI) | Erwarteter RMSE an unabhängigen Daten                                      |
| E(RVI)  | Erwartete Reduktion der Fehlervarianz an unabhängigen Daten                |
| ff      | 10-minütiger Mittelwind  |
| fx      | Windböe  |

## Abkürzungsverzeichnis

|                 |   |
|-----------------|---|
| M               | Anzahl der verwendeten Prediktoren            |
| MOS             | Model Output Statistics                       |
| MSwr            | <i>METEO SERVICE weather research</i>         |
| MV              | <i>Mean Value</i> : Mittelwert des Prediktors |
| m ü. A.         | Meter über Adria                              |
| m ü. NN.        | Meter über Normal Null                        |
| N               | Bedeckungsgrad                                |
| N_Obs           | Anzahl der Observationen                      |
| N_Pr            | Anzahl der verwendeten Prediktoren            |
| Name            | Name des Prediktors                           |
| $\overline{Pd}$ | Mittelwert der Prediktanden                   |
| $Pd_i$          | Prediktandenreihe                             |
| $\overline{Pr}$ | Mittelwert der Prediktoren                    |
| $Pr_i$          | Prediktorreihe                                |
| $R_{Pr,Pd}$     | Korrelation zwischen Prediktor und Prediktand |
| $R_{krit}$      | kritische Korrelation                         |
| Pd              | Prediktand                                    |
| pp              | Anzahl der potentiellen Prediktoren           |
| ppp             | auf Meeresniveau reduzierter Luftdruck        |
| Pr              | Prediktor                                     |
| R(Pd)           | Korrelation des Prediktors zum Prediktanden   |
| R_krit          | kritische Korrelation                         |
| RMSE            | Root Mean Squared Error                       |
| RR              | Niederschlagsmenge                            |
| RV              | Reduktion der Fehlervarianz                   |
| S               | Konfidenz-Level                               |
| Sd              | Sonnenscheindauer                             |
| SD              | Standardabweichung des Prediktors             |
| TTd             | Taupunkts Temperatur                          |
| TTm             | Temperaturmaximum                             |

## Danksagung

|     |   |
|-----|---|
| TTn | Temperaturminimum   |
| UTC | koordinierte Weltzeit (engl. <i>Coordinated Universal Time</i> )                    |
| Wgt | prozentuales Gewicht des Prediktors (Summe = 1)                                     |
| WMO | Weltorganisation für Meteorologie (engl. <i>World Meteorological Organization</i> ) |
| Wn  | Wetterzustand nachmittags   |
| Wv  | Wetterzustand vormittags  |
| x   | unabhängige Variable  |
| y   | abhängige Variable  |

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung der Bachelorarbeit unterstützt haben.

Ganz besonders gilt dieser Dank Dipl.-Met. Klaus Knüpffer, der meine Arbeit und somit auch mich über einen langen Zeitraum betreut hat. Mir wurde von ihm nicht nur die Möglichkeit gegeben mich mit *Moses* in der Firma METEO SERVICE auseinander zusetzen, Er gab mir immer wieder durch kritisches Hinterfragen und konstruktive Kritik wertvolle Hinweise. Vielen Dank für die Mühen und Geduld.

Danken möchte ich schließlich meinen Betreuern Dr. Martin Göber sowie Prof. Dr. Henning Rust, die mir während der Anfertigung wertvolle Hilfestellungen in der Organisation sowie dem Aufbau geben konnten.

Ferner möchte ich Dr. Rainer Siegmund-Schultze meinen Dank aussprechen, der während der Anfertigung dieser Arbeit eine neue, ausführlichere Turniermetrik implementierte.

Daneben gilt mein Dank Dipl.-Met. Gregor Neubarth, welcher mit Korrekturvorschlägen auf die Stellen verwies, an denen noch Klärungsbedarf bestand.

Nicht zuletzt gebührt meinen Eltern Dank, ohne welche dieses Unterfangen schon im Vorhinein niemals zustande gekommen wäre.

## Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, die Bachelorarbeit selbstständig und lediglich unter Benutzung der angegebenen Hilfsmittel und Quellen verfasst zu haben. Die den Quellen wörtlich oder sinngemäß entnommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Ich erkläre weiterhin, dass die vorliegende Arbeit noch nicht veröffentlicht oder im Rahmen eines anderen Prüfungsverfahrens eingereicht wurde.

---

Ort, Datum, Unterschrift