

# Kapitel 9

## Analoge Fälle mit nachfolgender Regression (AFREG)

### 9.1 Einführung und Zielsetzung

Im Jahre 1890 arbeitete der Hamburger Meteorologe Seemann an einer Objektivierung der Wettervorhersage auf der Grundlage der Mustererkennung. Hierzu stellte er einen Katalog der ersten 10 Jahre der Wetterkarten (1876-1885) auf. Jeder Wetterlage wurde eine Zahlenkombination, die aus drei Luftdruckunterschieden (von Hamburg in Richtung NW, SW und NO) berechnet werden konnte, zugeordnet.

**Zitat 4** Um aus einem europäischen Wetterbild das kommende Wetter annähernd vorausbestimmen zu können, ist nichts geeigneter als der Anhalt, den ein früherer ähnlicher Zustand im Luftmeer über Europa uns bietet. Es ist daher wünschenswert, einen solchen Zustand aus der verflossenen Zeit, soweit die Wetterkarten zurückreichen, in leichter und übersichtlicher Art, wie aus einem Lexikon, entnehmen zu können. *Zitat in [Balzer 1995]*

So einfach und großartig die Idee auch war, Erfolg stellte sich nicht ein. Mitte der 60er-Jahre begannen Wissenschaftler unterschiedlicher Wetterdienste mit Experimenten einer *objektiven* (besser: algorithmisierten) *statistisch-dynamischen*, Wettervorhersage. Hierzu zählen Maede vom Meteorologischen Dienst der DDR, Lönnqvist vom Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Institut [Lönnqvist 1971] und Klein vom US Wetter Büro [Klein 1966]. Grundlage für den Erfolg dieser Experimente waren die Einführung von Höhenwetterkarten durch Scherhag und die Ergebnisse der numerischen Wettervorhersagen. Dabei zeigte sich, dass bei ähnlichen Bodenwetterlagen durchaus sehr verschiedene Höhenwetterlagen herrschen können.

Ende der 60er- und Anfang der 70er-Jahre wurde ein Grundmodell zur statistischen Interpretation beim Meteorologischen Dienst der DDR entwickelt [Balzer 1984, Balzer 1991]. Dieses Modell wurde im Routinedienst sehr erfolgreich

eingesetzt. Es wurde auch in den Routinedienst des Deutschen Wetterdienstes übernommen. Im Artikel [Balzer 1991] wird die überarbeitete Version des Modells sehr detailliert beschrieben. Ein Einsatzbeispiel im Bereich der operativen Immissionsprognose zeigt [Balzer 1986].

Wie im Kapitel 7 dargelegt, gibt es einen Zusammenhang zwischen den meteorologischen Verhältnissen am jeweiligen Tag und den auftretenden Ozonwerten. Wenn es möglich ist, das Entwicklungskollektiv dynamisch entsprechend dem vorherzusagenden Tag einzuschränken, so sollte sich die Vorhersagequalität verbessern. Vorteil bei der dynamischen Anpassung der Regression ist auch, dass Veränderungen in der Korrelation zwischen den meteorologischen Bedingungen und Ozon erfasst werden können.

## 9.2 Methode

Damit die Methode nutzbar ist, müssen die folgenden Fragen beantwortet werden. Was ist Ähnlichkeit? Wie kann diese bestimmt werden? Die entscheidenden Antworten sind schon im Kapitel 7.3 gegeben worden. Somit kann an dieser Stelle auf die dort beschriebene Distanzmaßmethode zurückgegriffen werden.

### 9.2.1 Unterschiede zwischen einer Wetterlagenklasse und analogen Fällen

Wenn die gleichen Methoden wie bei der Wetterlagenklassifikation genutzt werden, so ist es notwendig, den Unterschied zwischen Wetterlagen und analogen Fällen zu erklären. Bei der Zuordnung eines Tages zu einer Wetterlage wird der Tag mit den mittleren Wetterlagenmustern verglichen. Nach der Berechnung der Distanzmaße wird der Tag der Klasse zugeordnet, zu der er die geringste Distanz hat. So kann es passieren, dass zwei relativ ähnliche Tage zwei unterschiedlichen Klassen zugeordnet werden. Das Konzept der analogen Fälle geht weg von der für die Wetterlagen genutzten statischen Zuordnung, hin zu einer dynamischen Zuordnung. Für jeden zu untersuchenden Tag wird zu jedem Tag im Archiv das Distanzmaß berechnet. Nach einer Sortierung der Größe nach kann gesagt werden, welcher der im Archiv liegenden Tage der ähnlichste Tag ist. Weiterhin kann der zweitähnlichste Tag usw. benannt werden.

Ein wichtiger Aspekt darf nicht unerwähnt bleiben. Es erfolgt eine Suche nach ähnlichen Tagen, nicht nach identischen! Die Suche nach identischen Tagen wäre sehr wahrscheinlich nicht von Erfolg gekrönt. Analog zu Fingerabdrücken ist es sehr unwahrscheinlich, zwei identische Tage zu finden.

## 9.2 Methode

---

### 9.2.2 Daten

Das hier zur Verfügung stehende Datenarchiv wurde schon in den Kapiteln 7.3.1 und 7.3.2 beschrieben. Für die Selektion der ähnlichen Tage wurden die meteorologischen Felder wieder in annähernd äquidistante Felder transformiert (für die dazu gehörigen Gitterpunkte siehe Abbildung 7.2). Während bei den Wetterlagen die Normierung anhand der mittleren Felder erfolgte, werden hier die Normierungsparameter aus den Feldern des aktuellen Tages berechnet.

### 9.2.3 Suche nach den Feld - Prädiktoren

Als nächstes musste geklärt werden, welche Felder für die Berechnung des Distanzmaßes herangezogen werden können. Diese wurden wiederum durch eine Screening-Analyse ermittelt. Parallel dazu wurde untersucht, wie viele analoge Tage für die optimale Vorhersage genutzt werden sollten. Der Idee der analogen Fälle folgend, sollen die Verhältnisse am ähnlichsten Tag oder an den ähnlichsten Tagen als Vorhersage für den aktuellen Tag genutzt werden. Daher musste die Frage beantwortet werden, ob der ähnlichste Tag dafür ausreicht oder aber, ob mehrere ähnliche Tage notwendig sind.

Die Suche wurde wie folgt durchgeführt: für jeden Tag wurden die Distanzmaße zu den Archivtagen bestimmt. Als Erstes wurde nur der ähnlichste Tag genutzt. Die maximale Ozonkonzentration der jeweiligen Station am ähnlichsten Tag wurde als Vorhersage für die aktuelle Ozonkonzentration genutzt. Bei der ersten Iteration wurde diese Vorhersage für jedes Feld, für mehrere Jahre durchgeführt. Am Ende wurde geprüft, bei welchem Feld, gemittelt über alle Stationen, die größte Vorhersageleistung auftritt. Anstelle des ähnlichsten Tages wurden als nächste Schritte die gemittelten Ozonwerte der ähnlichsten fünf Tage als Vorhersage genutzt. Dieses erfolgte auch für 10, 20, 30 und 50 Tage. Im nächsten Schritt wurde zu dem jeweils besten Feld ein zweites hinzugenommen. Die Screening-Analyse konnte drei Felder auswählen.

Als Optimum erwies sich die Wahl der Felder 7, 13 und 17 (siehe Tabelle 7.1). Diese entsprechen denen die zur Trennung der Wetterlagen genutzt werden. Folgt man den oben genannten Überlegungen, so ist das auch nicht überraschend.

### 9.2.4 Die bedingte Regressionsanalyse

Alternativ zu dem Mittelwert der Ozonwerte der ähnlichsten Tage als Vorhersage, kann auch eine Regression über einzelne Parameter der ähnlichsten Tage erfolgen. Hierzu konnte wiederum eine Screening-Analyse die besten Prädiktoren aus der Tabelle F.3 auswählen. Zur Vereinheitlichung wurden dann die besten zwei Orts-Prädiktoren (Maximum der Ozonkonzentration des Vortages und die 12 UTC Temperatur am nächstliegenden DWD Gitterpunkt) für alle Stationen genutzt. Anhand der ähnlichsten Tage und der dort aufgetretenen Maxima der

## Analoge Fälle mit nachfolgender Regression (AFREG)

---

Ozonkonzentrationen, Vortageswerte der Maxima der Ozonkonzentration und der 12 UTC Temperatur kann für jeden Tag einzeln eine neue Regressionsfunktion trainiert werden. Mit dem Vortagsmaximum der Ozonmessung und der für den aktuellen Tag vorhergesagten Temperatur, kann dann die Ozonprognose berechnet werden. Dies wird für jede Station durchgeführt. Für die Prognose der Folgetage werden die prognostizierten Ozonkonzentrationen als Persistenz genutzt. Weiterhin erwies es sich als sinnvoll, nicht nur den ähnlichsten Tag zu nutzen, sondern die ähnlichsten 30 Tage (siehe Tabelle 9.1). Die Unterschiede bei dem RMSE der Persistenz in Tabelle 9.1 ergeben sich dadurch, dass es für jede der Untersuchungen eine andere Anzahl an Tagen gab, für die eine Prognose möglich war. So mussten bei den Untersuchungen an mindestens 50 % der analogen Tage auch Ozonkonzentrationen an der jeweiligen Station gemessen worden sein. Waren weniger Tage mit gemessenen Ozonkonzentrationen vorhanden, wurde keine Prognose erstellt.

**Tabelle 9.1.** Vergleich der Rechnung mit unterschiedlicher Anzahl an ähnlichen Tagen, Vorhersageleistung gemittelt über alle Stationen ( $\approx 330$ )

Tage	RMSE Prog	RMSE Per	RV
10	21.0	28.7	46.6
20	19.8	29.1	53.9
30	19.1	29.0	56.9
50	19.4	29.0	55.1

Auch bei dieser Prognose erfolgte nur eine Optimierung über alle Tage. Die Ergebnisse für die Prüfung ohne Schwellenwert (allen Prognosen werden geprüft) als auch für die schwellenwertabhängige Prüfung (wenn Prognose oder Messung den Schwellenwert überschreitet) ist in Tabelle 9.2 zu finden. Der Bias der Tage mit Schwellenwerten  $> 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ist so hoch, dass eine weitergehende Nutzung nicht mehr zu empfehlen ist. Die Ursache ist in der geringen Häufigkeit von Tagen mit hohen Ozonkonzentrationen zu finden. Nicht an allen Tagen mit ähnlicher großräumiger Wetterlage (z.B. Hochdruckgebiet) treten gleichhohe Ozonwerte auf. Insbesondere bei an Tagen mit hohen Ozonwerten hat die Vortagesituation einen großen Einfluss. Die nachgeordnete Regression schafft es nicht diesen Einfluss im ausreichenden Maße einzubringen. Bei einer weiteren Verwendung (Kapitel 10) muss dieser Umstand beachtet werden.

## 9.2 Methode

**Tabelle 9.2.** Verifikation der Vorhersageleistung der stationsbezogenen Ozonvorhersage gemittelt über alle Stationen (330); die Daten beziehen sich auf die Monate Mai bis Juli 2002; Ergebnisse der AFREG-Methode (AN)

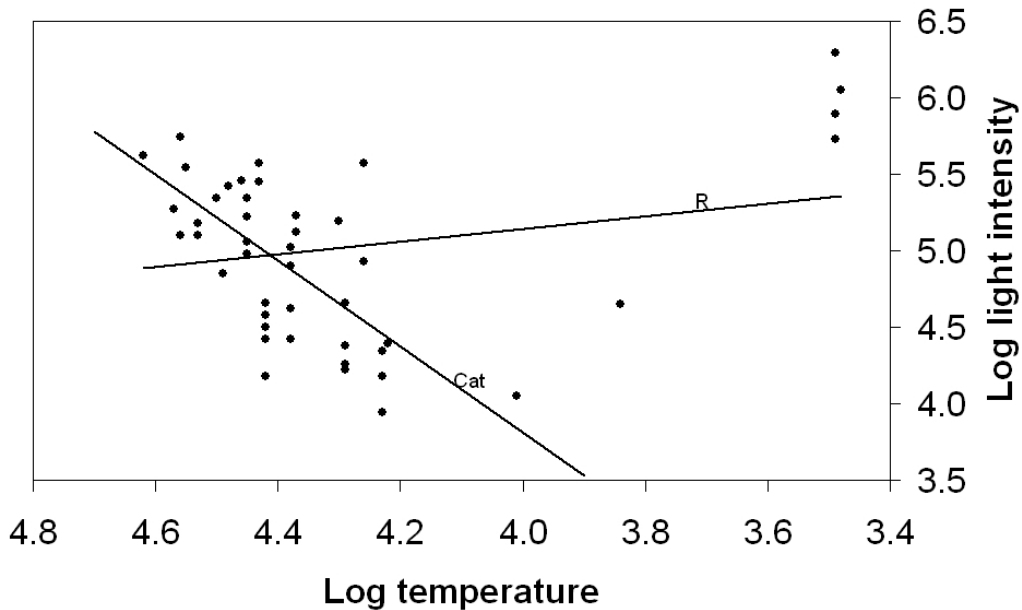
Schwellenwert:		ohne					
	Bias	RMSE Prog	Bias	RMSE Per	RV	%	
aktueller Tag	1.7	19.1	-0.2	29.0	56.9	100.0	
1. Folgetag	1.6	24.2	-0.2	36.1	55.2	100.0	
2. Folgetag	1.8	25.3	-0.6	39.2	58.3	100.0	
Schwellenwert:		120 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]					
	Bias	RMSE Prog	Bias	RMSE Per	RV	%	
aktueller Tag	-7.0	24.2	-14.5	34.2	49.9	26.5	
1. Folgetag	-13.1	33.3	-19.6	46.7	49.2	26.8	
2. Folgetag	-13.1	34.2	24.0	51.6	56.1	28.3	
Schwellenwert:		150 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]					
	Bias	RMSE Prog	Bias	RMSE Per	RV	%	
aktueller Tag	-15.2	30.8	-22.7	40.7	42.4	6.1	
1. Folgetag	-32.1	48.6	-40.7	62.2	39.0	5.6	
2. Folgetag	-38.8	50.2	-55.2	71.5	50.7	5.4	
Schwellenwert:		180 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]					
	Bias	RMSE Prog	Bias	RMSE Per	RV	%	
aktueller Tag	-26.6	40.2	-38.8	53.1	42.7	0.8	
1. Folgetag	-60.2	71.5	-72.1	88.0	34.0	0.7	
2. Folgetag	-70.2	76.8	-96.5	103.6	45.0	0.7	

### 9.2.5 Robuste Regression mit Hilfe der Catline

Bei der Arbeit mit gemessenen Datenreihen sind durch Messfehler bedingte Ausreißer, trotz Datenvalidierung (Kapitel 6), nicht auszuschließen. Demzufolge kann vermutet werden, dass im Kollektiv der 30 ähnlichsten Tage Tage enthalten sein können, die nicht wirklich zueinander ähnlich sind. Werden diese *fehlerbehafteten* Werte für Regressionen auf der Basis der Methode der kleinsten Quadrate genutzt, so haben diese Werte einen starken verfälschenden Einfluss.

Daher ergibt sich die Notwendigkeit, alternativ zur Regression mit der Methode der kleinsten Quadrate, über robuste Methoden zur Regression nachzudenken. Eine neue und in der Theorie sehr schlichte Methode ist die Catline nach [Hubert und Rousseeuw 1998] (siehe auch [Taubenheim 2002]). Sie ist durch ihren theoretischen Ansatz unempfindlich gegen jegliche Art von Ausreißern.

Die Vorgehensweise ist wie folgt: Als erstes werden die Werte entsprechend dem x-Wert sortiert. Die sortierte Reihe wird in drei gleichgroße Teile zerlegt (Linker (L), Mittlerer (M) und Rechter (R) Teil). Grob gesagt hat die Catline die Eigenschaft, dass die Anzahl der positiven Residuen in L gleich der Anzahl der



**Abbildung 9.1.** Herzprung-Russel-Diagramm eines Sternengruppen Cygnus, analysiert mit der Catline (Cat) und der einfachen linearen Regression (R), nachempfunden der Abbildung 2 in [Rousseeuw und Hubert 1999]

negativen Residuen in M ist. Die negativen Residuen in M sind wiederum gleich den positiven Residuen in R. Das ganze gilt auch umgekehrt. Die Größe des einzelnen Abstandes ist dabei unbedeutend. Die dafür genutzte Routine ist unter <http://win-www.uia.ac.be/u/statis> unter der Bezeichnung *deepest regression*, zu finden.

Am Beispiel der Abbildung 9.1 kann der Vorteil der Methode gut dargestellt werden. Die Trendlinie (R) ist eindeutig von den vier Ausreißern beeinflusst. Die Catline (Cat) ist gegen diese Einflüsse unempfindlicher. Einen solchen Vorteil hat die Methode aber nur bei Kollektiven, die eindeutig bzw. sehr wahrscheinlich Ausreißer haben. Ansonsten liefert die Methode der kleinsten Quadrate bessere Ergebnisse bei der Entwicklung von Regressionsfunktionen.

Die Nutzung der Catline-Methode im Rahmen der Entwicklung zeigt damit gleich zwei Ergebnisse. Gibt es in den Kollektiven der 30 ähnlichsten Tage Ausreißer und wenn ja, sind dann die Vorhersagen mit robusten Regressionsmethoden besser?

Die Antwort ist kurz. Der Einsatz der robusten Regressionsmethode bringt keine Verbesserung, sondern eine leichte Verschlechterung der Vorhersageergebnisse (siehe Tabelle 9.3). In Anlehnung an das oben gesagte heißt das: in den Kollektiven der 30 ähnlichsten Tage sind wahrscheinlich keine Ausreißer vorhanden.

### 9.3 Zusammenfassung und Diskussion

---

**Tabelle 9.3.** Vergleich der Ergebnisse der Methode der kleinsten Quadrate mit Catline, Vorhersageleistung gemittelt über alle Stationen (330)

Schwelle	Methode der kleinsten Quadrate			Catline		
	RMSE Prog	RMSE Per	RV	RMSE Prog	RMSE Per	RV
ohne	19.1	29.0	56.9	19.2	29.0	56.7
120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24.2	34.2	49.9	24.3	34.2	49.6
150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	30.8	40.7	42.4	31.0	40.7	41.9
180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40.2	53.0	42.7	40.5	53.0	41.7

Eine Möglichkeit täglich zu kontrollieren, wie ähnlich die genutzten Fälle sind und daraus ein Gütemaß abzuleiten, ist die Berechnung des mittleren Distanzmaßes aller genutzter Fälle. Je höher das mittlere Distanzmaß, desto unähnlicher sind die genutzten Fälle und umgekehrt.

### 9.3 Zusammenfassung und Diskussion

Die Erwartungen sind erfüllt worden. Mit der Methode der Analogen Fälle ist es möglich, eine gute Vorhersagequalität zu erreichen. Nachteilig wirkt sich aus, dass bei Tagen mit hohen gemessenen Ozonkonzentrationen eine deutliche Unterschätzung der Ozonverhältnisse auftritt. Bei einer weiteren Nutzung der Prognoseergebnisse sollte dies einbezogen werden.

Bei Kontrollrechnungen zeigte sich, dass der Einsatz dieser Routine besonders in den Monaten September bis April erfolversprechend ist. In diesen Monaten treten nur sehr selten hohe Ozonkonzentrationen auf, womit sich der Nachteil dieser Methode relativiert. Somit kann auch für Monate, für die bisher keine Prognose gerechnet wurde, der Bevölkerung eine Vorhersage zur Verfügung gestellt werden. Durch die üblicherweise sehr niedrigen Ozonkonzentrationen ist das Interesse der Bevölkerung für Prognosen in diesen Monaten meist aber sehr gering. Die anderen in dieser Arbeit vorgestellten Routinen können diese Aufgabe nicht erfüllen, da sie anhand der Sommermonate Mai bis August optimiert worden sind.

Der entscheidende Vorteil der AFREG-Routine ist die dynamische Anpassung der Regressionsroutinen an die analogen Tage. Damit ist diese Routine noch in mehreren Jahren ohne Anpassung der Regressionsfunktionen einsetzbar. Der Nachteil des großen negativen Bias bei hohen Ozonkonzentrationen limitiert den möglichen Einsatz jedoch deutlich.

## Analoge Fälle mit nachfolgender Regression (AFREG)

Die Umsetzung im Rahmen der operationellen Prognose kann in drei Teilschritten erfolgen:

- Ermittlung der 30 ähnlichsten Tage entsprechend der meteorologischen Verhältnisse von 12 UTC,
- Ableitung der stationsbezogenen Regressionsbeziehungen an den 30 ähnlichsten Tagen unter Nutzung der eingetroffenen Ozonwerte (Prädiktand), der Ozonpersistenz und der prognostizierten Temperatur (Prädiktoren)
- und stationsweise Prognose mit Ozonpersistenz und prognostizierter Temperatur.