

# Kürzestfristvorhersage der Windgeschwindigkeit in einem Wirbelschleppenwarnsystem für Flughäfen

Uwe Schlink, Gerd Tetzlaff

## Zusammenfassung:

Die lange Lebensdauer und die hohe Intensität der Wirbelschleppen landender Großraumflugzeuge kann zu einer Gefährdung des nachfolgenden Verkehrs führen. Zur Vorhersage einer gefahrungsfreien Nutzungszeit der Landebahn, nach der die Staffelungsabstände der landenden Flugzeuge bestimmt werden, dient ein Wirbelschleppenwarnsystem. Ein wesentlicher Teil dieses Warnsystems ist die Vorhersage des quer zur Landebahn wehenden Windes. Dafür wird bisher ein auf Persistenz beruhendes Verfahren eingesetzt. Die vorliegende Arbeit zeigt, daß durch Verwendung eines autoregressiven Modells die Querwindprognose verbessert werden kann. Dazu werden die Meßdaten analysiert und die Modellparameter geschätzt. Der Einsatz der AR Prognose im Wirbelschleppenwarnsystem führt im Vergleich zur bisherigen Methode zu längeren Nutzungszeiten und vermeidet das Auftreten von Diskontinuitäten (Sprüngen) in der Vorhersage. Besonders durch letzteres wird die Akzeptanz des Warnsystems bei den Fluglotsen verbessert.

## Summary:

Wake vortices of landing heavy aircraft are intensive and show long life time. They are thus capable to endanger following air traffic. The prediction of the propagation paths of wake vortices can help to identify time intervals in which it is possible to use the parallel runways independently. The wake vortex warning system has the purpose to produce such predictions. The major predictor is the wind component perpendicular to the runway. The short prediction period makes the use of the persistency for the warning system plausible. The performance of such simple prediction methods can be improved by using an autoregressive method (AR). To find the relevant parameters a data set of wind data comprising about two years observations was used. The AR-based predictions as a wake vortex warning system improves the quality of the prediction, makes them more continuous avoiding prediction jumps, and finally allows longer periods of independent use of the parallel runways.

## Einleitung

Die starke Abhängigkeit des Luftverkehrs von den Wetterbedingungen wird an der Präsenz der Flughafenmeteorologen deutlich. Sie veröffentlichen Vorhersagen über die meteorologischen Bedingungen in der unmittelbaren Umgebung des Airports (Gordon, 1992). Aber auch die Flugzeuge selbst beeinflussen die Strömungsverhältnisse direkt an der Landebahn. Jedes Flugzeug erzeugt ein Paar stark rotierender Wirbel. Sie werden als Wirbelschleppe bezeichnet und breiten sich im Nachlauf aus. Besonders bei Großraumflugzeugen kann die Intensität der beiden innerhalb der Wirbelschleppe enthaltenen Wirbelkerne so groß sein, daß nachfolgende Flugzeuge beim Einfliegen in diese Turbulenzkörper beschädigt werden oder sogar abstürzen. Einer Studie aus dem Jahre 1977 zufolge traten im Zeitraum von 1964-73 in den USA immerhin 86 Flugunfälle auf, die auf den Einfluß der Wirbelschleppen zurückzuführen waren (Franke, 1995).

Die lange Lebensdauer der Wirbelschleppen und ihre Ausbreitung in Bodennähe führen dazu, daß es nicht nur zu einer Gefährdung hintereinanderfliegender Flugzeuge kommt, sondern daß auch seitlich versetzt fliegende Maschinen durch die Wirbelschleppen in Mitleidenschaft gezogen werden können. Besonders bei dicht aneinandergrenzenden Landebahnen kommt es zu einer starken Beeinflussung durch driftende Wirbelschleppen. Deshalb müssen auch hier gegebenenfalls Staffelungsabstände eingehalten werden, was jedoch zu Kapazitätsproblemen an den betroffenen Flughäfen führen kann. Insbesondere an großen Flughäfen bedeutet Flugverkehrsplanung eine Mangelverwaltung von verfügbaren Start- und Landezeiten. Durch Zeitverzögerungen werden Zusatzkosten verursacht. Die Errichtung neuer Landebahnen ist aus geographischen, ökologischen und finanziellen Gründen nicht immer möglich.

Verbesserungen sind also im Wesentlichen nur über eine optimierte Flugverkehrskontrolle zu erreichen. Das bedeutet, den Anflugverkehr so zu steuern, daß Wartezeiten vermieden werden und eine maximale Nutzungszeit entsteht. Bei zu diesem Zweck verringerten Staffelungsabständen beim Landeanflug müssen jedoch die von den Wirbelschleppen ausgehenden Gefahren berücksichtigt werden.

Aus diesem Grund wurde ein Wirbelschleppenwarnsystem entwickelt (Franke, 1995). Dabei wurden das Wirbelverhalten innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht analysiert und die für die Wirbelverlagerung wichtigen Einflußgrößen erfaßt. Der Prognosealgorithmus dieses Warnsystems ermittelt für Vorhersagezeiträume von etwa 10 Minuten die maximal möglichen Wanderweiten. Das verwendete Wirbelverlagerungsmodell geht von einer Aufspaltung der Problemstellung in zwei Teilaufgaben aus. Einerseits muß eine Vorhersage der Wirbellebensdauer erfolgen. Zum anderen ist eine Prognose der quer zur Landebahn gerichteten Windkomponente erforderlich. Diese Kurzzeitvorhersage der 2-Minuten-Mittelwerte der Querwindgeschwindigkeit wird bei Franke (1995) mit einem Persistenzmodell mit Weibull-verteiletem Sicherheitszuschlag realisiert.

Die hier vorgestellten Untersuchungen hatten das Ziel, diese Querwindprognose zu verbessern. Dabei mußte man davon ausgehen, daß neben synoptischen Einflüssen lokale Effekte sehr dominierend sind. Letztere umfassen z.B. Stömungseffekte, die durch die Orographie und das Bodenprofil bedingt sind (Otruba et al., 1988) und die thermische Konvektion. Da die Natur der Einflußgrößen sehr vielgestaltig und komplex ist, ist zu erwarten, daß zur Vorhersage ein pragmatischer Ansatz geeignet ist, der lediglich die in der Zeitserie der Winddaten enthaltene Information nutzt (Ding et al., 1996). Wie die Analyse der Datenserien zeigt, kann dabei über ein reines Persistenzmodell hinausgegangen werden. Das entwickelte autoregressive Modell wird im Rahmen des vorhandenen Wirbelschleppenwarnsystems getestet und die Nutzungsdauer berechnet. Die gefundenen Ergebnisse werden mit den von Franke (1995) angegebenen verglichen.

## **Datenanalyse**

Die verwendeten Ausgangsdaten wurden während verschiedener Meßkampagnen in den Jahren 1984 bis 1996 am Flughafen Frankfurt/Main beobachtet. Dazu wurde eine Kette von Propelleranemometern verwendet, deren Meßgenauigkeit  $\pm 0.05\text{m/s}$  und deren Anlaufgeschwindigkeit etwa  $0.2\text{m/s}$  betrug. Jeweils drei Propelleranemometer waren rechtwinklig zueinander am Ende eines der 7 Masten in einer Höhe von 10..12 m angebracht. Die Windgeschwindigkeiten der drei Richtungen wurden kontinuierlich registriert und von einem Datalogger mit einer Tastrate von 3Hz digitalisiert. Schließlich wurde jede Komponente über alle 7 Meßpunkte und 2 Minuten gemittelt. Für die Windvorhersage wurden die Zeitreihen von 2-Minuten-Mittelwerten des Querwindes verwendet (Abb. 1). Normalerweise sind Fluktuationen der Windgeschwindigkeit innerhalb von einigen Minuten das Ergebnis thermischer Konvektion oder durch

Wirbelscheinungen verursacht, die an Hindernissen entstehen. Letztere würden charakteristische Frequenzen im Spektrum der Windgeschwindigkeit zur Folge haben. Solche Hindernisse existieren natürlich in der unmittelbaren Umgebung eines Flughafens nicht. Dies erklärt, daß im Frequenzspektrum ausgeprägte Zyklen nicht erkennbar sind (Abb. 4). Jedoch kann man an der Autokorrelationsfunktion (Abb. 2) erkennen, daß die Daten sehr stark autokorreliert sind. Erst nach einem Lag von etwa 200 Werten (entspricht 6,7 Stunden) sinkt die Autokorrelation in den Konfidenzbereich für den Wert Null. Eine näherungsweise Beschreibung für empirische autokorrelierte Reihen gelingt häufig durch die von Box & Jenkins (1976) entwickelten linearen ARIMA[p,d,q]-Modelle (autoregressive integrated moving average). Die Modellanpassung vollzieht sich dabei üblicherweise in den folgenden vier Phasen: Identifikation, Parameterschätzung, Diagnose und Interpretation des Modells. Daran kann die praktische Anwendung des Modells, z.B. für die Prognose, anschließen. Im weiteren werden anhand einiger Datenbeispiele die Ergebnisse dieser vier Anpassungsschritte angegeben und diskutiert.

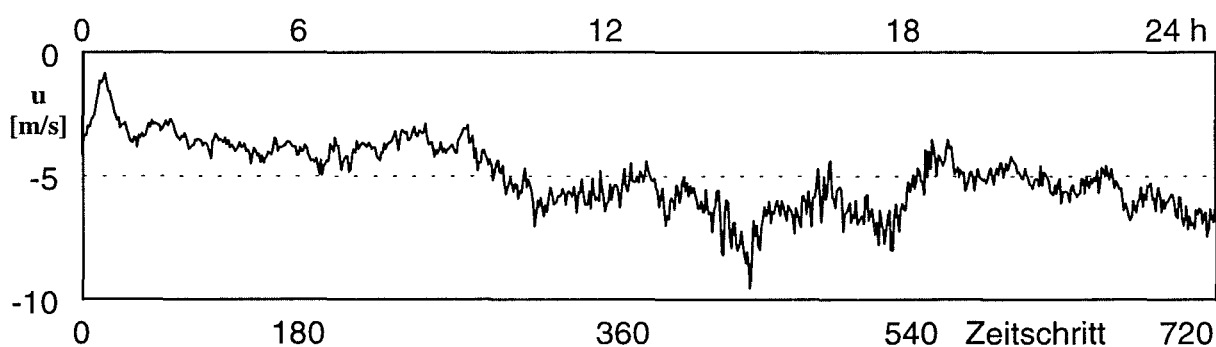


Abb. 1: Querwindkomponente  $u$  (in m/s) am ersten Meßtag

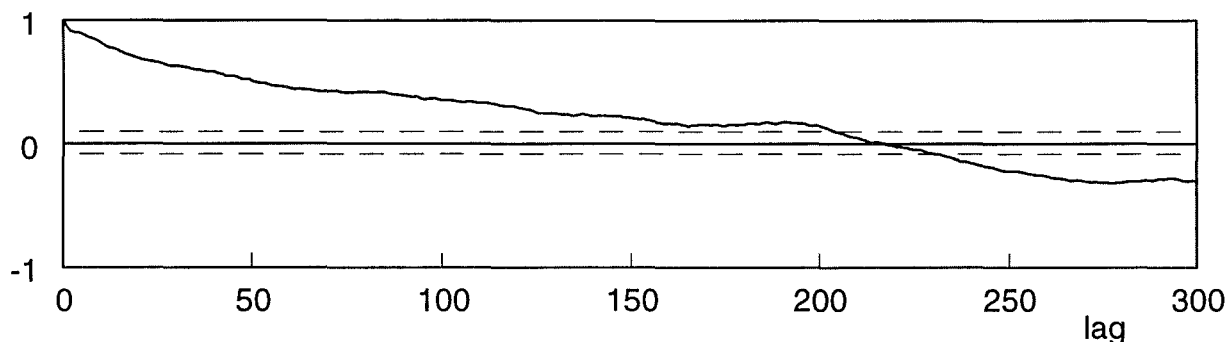


Abb. 2: Autokorrelationsfunktion (ACF) der Querwindkomponente am ersten Meßtag (gestrichelt: Konfidenzbereich für  $ACF=0$ )

## Modellierung

Da die hier vorliegenden Reihen keinen deutlichen Trend oder Zyklen enthalten, also stationär sind, gilt  $d=0$ . Die Spezifikation der Ordnungen  $p$  und  $q$  erfolgt nach Box & Jenkins mit Hilfe der Autokorrelationsfunktion (ACF) (Abb. 2) und der partiellen Autokorrelationsfunktion (PACF) (Abb. 3). Das langsame Abklingen der ACF und der plötzliche Abbruch der PACF deuten auf einen AR-Prozeß hin. Darüber hinaus sind die ersten fünf PACF-Werte signifikant, da sie außerhalb des Konfidenzintervalls für Null liegen. Somit läßt sich ein  $ARIMA[5,0,0] \equiv AR(5)$ -Prozeß identifizieren.

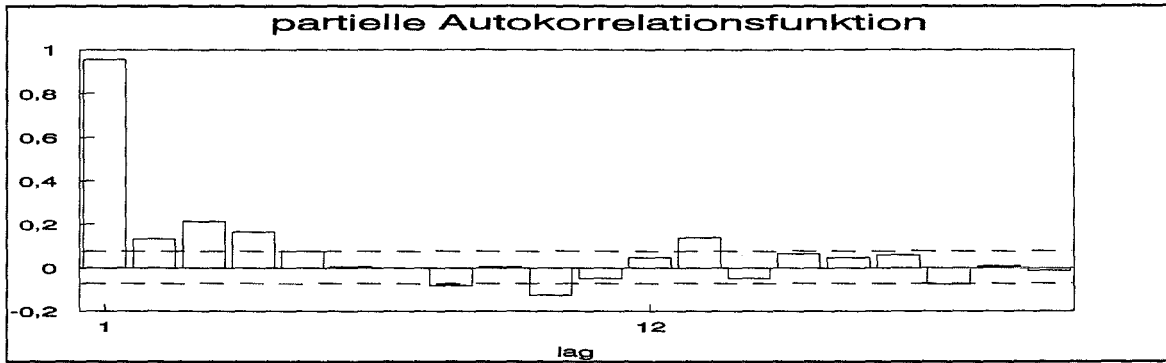


Abb. 3: Partielle Autokorrelationsfunktion der Querwindkomponente am ersten Meßtag

Für dieses AR(5)-Modell

$$(1 - \Phi_1 B^1 - \Phi_2 B^2 - \Phi_3 B^3 - \Phi_4 B^4 - \Phi_5 B^5) u_t = \varepsilon_t \quad (1)$$

sind die Parameter  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5$  sowie  $\sigma_\varepsilon^2 = \text{var}(\varepsilon_t)$  zu bestimmen.

Eine einfache Schätzung erhält man durch die Yule-Walker-Gleichungen. Sie wird durch rekursive Iteration weiter verbessert. Um einen Überblick über das Verhalten der gesamten Winddaten zu bekommen, ist es notwendig, die Modellierung auf weitere Messungen auszu-dehnen.

Für den Quer- (u), den Längs- (v) und den Vertikalwind (w) von drei unabhängigen Meßtagen wurde jeweils ein AR(5)-Modell identifiziert und dessen Parameter geschätzt (Tabellen 1 bis 3).

Tabelle 1: Geschätzte Modellparameter für den Querwind

Parameter	Tag 1	Tag 2	Tag 3
$\Phi_1$	+0.71	+0.74	+0.73
$\Phi_2$	-0.05	+0.06	+0.15
$\Phi_3$	+0.08	+0.12	+0.04
$\Phi_4$	+0.13	-0.04	+0.04
$\Phi_5$	+0.10	+0.09	-0.02
$\sigma_\varepsilon^2$	0.16	0.07	0.08
$R^2_T$	0.92	0.90	0.87

Tabelle 2: Geschätzte Modellparameter für den Längswind

Parameter	Tag 1	Tag 2	Tag 3
$\Phi_1$	+0.85	+0.85	+0.88
$\Phi_2$	+0.02	+0.05	+0.02
$\Phi_3$	+0.07	+0.10	+0.09
$\Phi_4$	-0.01	-0.02	-0.03
$\Phi_5$	+0.03	-0.0001	+0.01
$\sigma_\varepsilon^2$	0.16	0.09	0.13
$R^2_T$	0.82	0.96	0.93

Tabelle 3: Geschätzte Modellparameter für den Vertikalwind

Parameter	Tag 1	Tag 2	Tag 3
$\Phi_1$	+0.27	+0.32	+0.44
$\Phi_2$	+0.22	+0.24	+0.14
$\Phi_3$	+0.23	+0.10	+0.16
$\Phi_4$	+0.14	+0.11	+0.03
$\Phi_5$	+0.06	+0.15	+0.12
$\sigma^2_\varepsilon$	0.003	0.002	0.002
$R^2_T$	0.68	0.69	0.62

Der Schätzfehler der iterativen Bestimmung der Parameter  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5$  ist  $\leq \pm 0.05$ . Diese, für die Schätzung der Modellparameter angegebene Genauigkeit bezieht sich lediglich auf die Iteration der Parameter. Fehler infolge einer nicht korrekten Modellidentifikation sind nicht enthalten. Hierzu muß stets das AIC Kriterium herangezogen werden (siehe Abschnitt Modelldiagnose).

Eine abschließende Entscheidung über die Adäquatheit eines angepaßten Modells wird anhand von Maßzahlen, die die Güte eines Modells charakterisieren getroffen. Mit Hilfe einer solchen Modelldiagnose ist nun zu prüfen, ob die Meßreihe tatsächlich als eine typische Realisierung dieses geschätzten AR(5)-Prozesses aufgefaßt werden kann. Dazu wird beispielsweise das durch das Modell erzeugte Frequenzspektrum mit dem Spektrum (Periodogramm) der Meßreihe verglichen. In Abb. 4 sind beide im logarithmischen Maßstab eingezeichnet. Man erkennt, daß das Modell den prinzipiellen (geglätteten) Verlauf des gemessenen Spektrums wiedergibt. Die auftretenden Differenzen zwischen Modell und Meßdaten sind im Residualterm et enthalten. Ihr Beitrag wird durch den ebenfalls in den Tabellen 1 bis 3 angegebenen Parameter  $\sigma^2_\varepsilon$  quantifiziert.

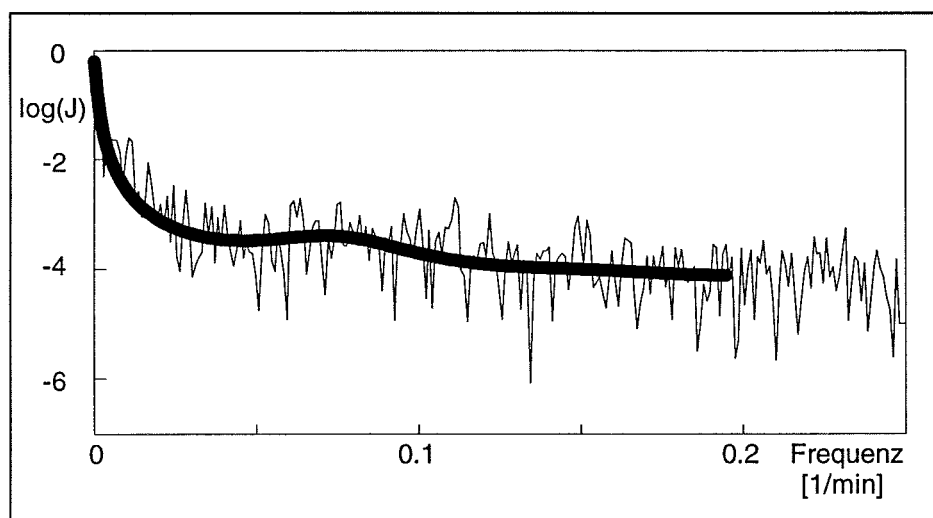


Abb. 4: Periodogramm des Querwindes des 1. Tages und Spektrum des angepaßten AR(5)-Modells (dicke Linie) in logarithmischer Darstellung, ( $J$  = relative spektrale Intensität)

Ein Gütekriterium, welches sich direkt aus den Residuen ableitet ist

$$R_T^2 = 1 - \frac{\sum \varepsilon_t^2}{\sum (u_t - \bar{u})^2}, \quad (0 \leq R_T^2 \leq 1). \quad (2)$$

Es setzt die Varianz (2. Moment) der Residuen  $\varepsilon_t$  ins Verhältnis zur Varianz der Meßdaten und ist somit ein normalisiertes Maß dafür, welcher Anteil der Datenvarianz durch das angepaßte Modell erklärt wird. Bei den in den Tabellen 1 und 2 gegebenen Resultaten zeigt sich mit  $R_T^2 \approx 0.90$ , daß etwa 90 % der Meßdatenvarianz durch die AR(5)-Modelle beschrieben wird. Bemerkenswert ist dabei der deutlich niedrigere Wert  $R_T^2 \approx 0.65$  bei der Modellierung des Vertikalwindes (vgl. Tab. 3). Da hier gleichzeitig  $\sigma_\varepsilon^2$  sehr klein ist, muß also die Varianz der vertikalen Windstärke einen besonders kleinen Wert annehmen.

### Interpretation

Der Modellparameter  $\Phi_1$  drückt die Korreliertheit zwischen benachbarten Meßwerten aus. Plötzliche, 'schroffe' Änderungen können bei z. B.  $\Phi_1 \approx 0.7$  nicht auftreten - das Windsystem besitzt eine mehr oder weniger große Trägheit oder Persistenz. Der aktuelle Meßwert baut auf 70% des Windwertes vom vorherigen Zeitschritt auf. Die zu höheren lags gehörenden Terme des AR-Modells stellen eine längerwirkende 'Rückkopplung' innerhalb des Prozesses dar. Durch solche Rückkopplungen können auch automatisch Periodizitäten in den Realisierungen des Modells entstehen. Ihre Intensität und Periode hängen natürlich von den Modellparametern ab. In Abb. 4 deutet sich solch ein Effekt im Spektrum an. Das implizite Enthaltensein von Periodizitäten in autoregressiven Prozessen wurde erstmals von Slutsky (1927) und Yule (1927) erkannt.

Vergleicht man die Modellparameter für die drei Windrichtungen, so zeigt sich ein deutlich anisotropes Verhalten: Besonders beim Vertikalwind nimmt  $\Phi_1$  wesentlich niedrigere Werte an (vgl. Tab. 3 mit Tab. 1 und 2). Die aktuelle Windstärke ist also im Vergleich zum Horizontalwind weniger stark von ihrem vorhergehenden Wert bestimmt (weniger autokorreliert). Die Streubreite des Residualterms ist, wie bereits oben festgestellt wurde, ebenfalls kleiner. Diese beiden Resultate stehen im Einklang mit der Vorstellung von einer horizontalen Schichtung der Atmosphäre. Dabei ist die vertikale Komponente sowohl in ihrer über längere Zeitabschnitte gleichförmigen (autokorrelierten) Bewegung, als auch in den unsystematischen Schwankungen (Streuung) weniger ausgeprägt, als dies bei den horizontalen Komponenten der Fall ist.

### Prognose

Für den hier vorliegenden Fall eines AR(5)-Modells

$$(1 - \Phi_1 B^1 - \Phi_2 B^2 - \Phi_3 B^3 - \Phi_4 B^4 - \Phi_5 B^5) u_t = \varepsilon_t \quad (3)$$

ergibt sich die Einschrittprognose

$$\hat{u}_{t+1} = \Phi_1 u_t + \Phi_2 u_{t-1} + \Phi_3 u_{t-2} + \Phi_4 u_{t-3} + \Phi_5 u_{t-4}, \quad (4)$$

und die Prognose über zwei Schritte, bei der ein bereits prognostizierter Wert eingeht, lautet

$$\hat{u}_{t+2} = \Phi_1 \hat{u}_{t+1} + \Phi_2 u_t + \Phi_3 u_{t-1} + \Phi_4 u_{t-2} + \Phi_5 u_{t-3}. \quad (5)$$

In diesem Sinne wird fortgesetzt.

Die Prognose ist stets eine gewichtete Summe aus zurückliegenden Beobachtungen, da man ja auch den ersten prognostizierten Wert in (11) wieder durch die fünf letzten Beobachtungswerte aus (10) ersetzen kann. Die Vertrauensbereiche für die AR(5)-Vorhersagen über T Zeitschritte berechnen sich gemäß Box & Jenkins (1979) zu

$$\hat{u}_{t+T}(\pm) = \hat{u}_{t+T} \pm u_{1-\alpha/2} \sigma_\epsilon P_T(\Phi_1, \dots, \Phi_5) \quad (6)$$

dabei ist  $u_{1-\alpha/2}$  das Quantil der standardisierten Normalverteilung für eine Sicherheit von  $(1-\alpha/2)$ .  $P_T(\Phi_1, \dots, \Phi_5)$  symbolisiert ein Polynom aus Potenzen der Modellparameter  $\Phi_1, \dots, \Phi_5$ . Mit zunehmendem Prognosehorizont T wird  $P_T$  und damit auch der Vertrauensbereich in Abhängigkeit von den Modellparametern größer. Zur Illustration dieses Prognoseansatzes wurden für den Querwind (u) des ersten Meßtages mit den bereits oben geschätzten Parameterwerten AR(5)-Vorhersagen berechnet (siehe Abb. 5). Die fett gezeichnete Kurve stellt die Meßwerte dar, die dünn gezeichneten geben die Vertrauensbereiche der Prognosen wieder. Je länger der Vorhersagezeitraum ist, um so breiter wird der Konfidenzbereich. Gleichzeitig werden Abweichungen vom mittleren Niveau immer weniger deutlich vorhergesagt. Das bedeutet, daß mit zunehmendem Vorhersagezeitraum die Prognosekurven immer glatter werden.

Die innere Prognosekurve greift nur einen Zeitschritt (2 min) in die Zukunft. Dagegen sagt das äußere Kurvenpaar den Verlauf über 5 Zeitschritte (10 min) vorher. Für zwei Beispiele ist jeweils der Prognosepunkt der Meßreihe mit den dazugehörigen Vorhersagen verbunden worden (gestrichelt), so daß zum Prognosezeitpunkt alle links von der parabelförmigen Abgrenzung befindlichen Daten bekannt sind.

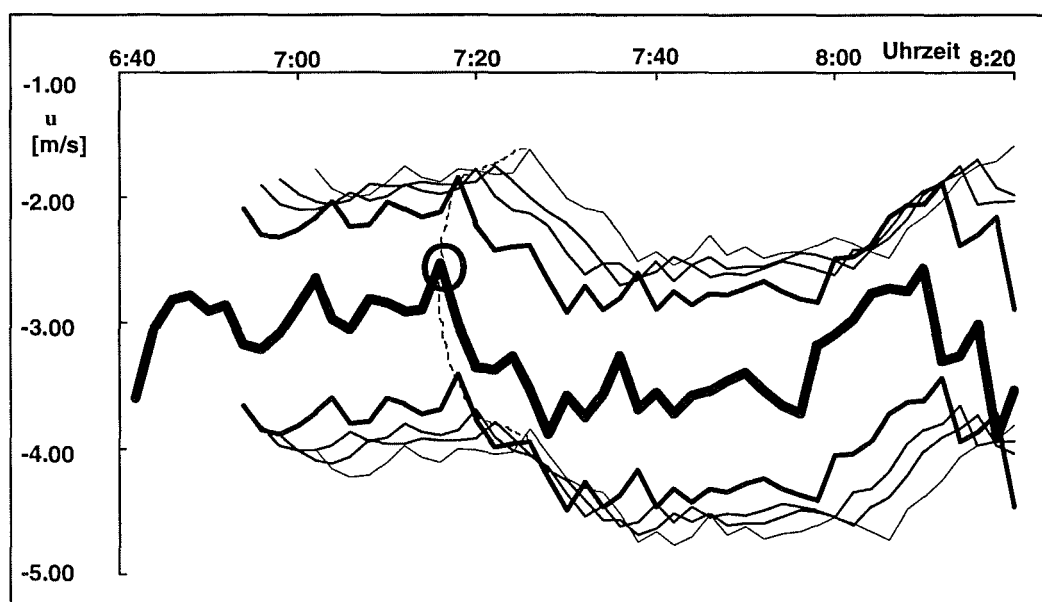


Abb. 5: AR(5)-Vorhersage von Querwindgeschwindigkeiten des ersten Meßtages: Messung (fett) und Konfidenzbereiche der Prognosen über 2, 4, 6 und 10 min (dünne Linien von innen nach außen).

## Methodenvergleich

Von Franke (1995) wurde für die Querwindkomponente  $u$  eine Vorhersagemethode vorgeschlagen, die mit zwei klassierten Stabilitätskenngrößen und einem davon abhängigen Weibullverteilten Sicherheitszuschlag arbeitet. Dieses Verfahren geht jedoch lediglich vom letzten Meßwert des Querwindes aus, kann also als Persistenzverfahren bezeichnet werden. Informationen aus der Vergangenheit sind nur in den Stabilitätskenngrößen enthalten und gehen so in den Sicherheitszuschlag ein.

Die Leistungsfähigkeit des hier entwickelten AR-Prognoseansatzes soll nun mit der des Persistenz-Vorhersagesystems verglichen werden. Zu diesem Zweck wurde der Mittelwert der für die Tage 1 bis 3 geschätzten AR-Modellparameter (vgl. Tab. 1) zur Querwindprognose des nächsten Tages verwendet.

In Abb. 6 sind für den 4. Meßtag der reale Verlauf der Meßreihe (mittlere fette Kurve) sowie der über 5 Zeitschritte (= 10 Minuten) mit der AR-Prognose vorhergesagte Vertrauensbereich angegeben. Dieser Vertrauensbereich ist auf eine statistische Sicherheit von 95% eingestellt. Die in 5% der Fälle auftretenden Fehlprognosen des Querwindes zeigen sich an den Zeitpunkten, an denen die realen Meßwerte (fette Kurve) außerhalb des Bereiches zwischen den Prognosegrenzen liegen.

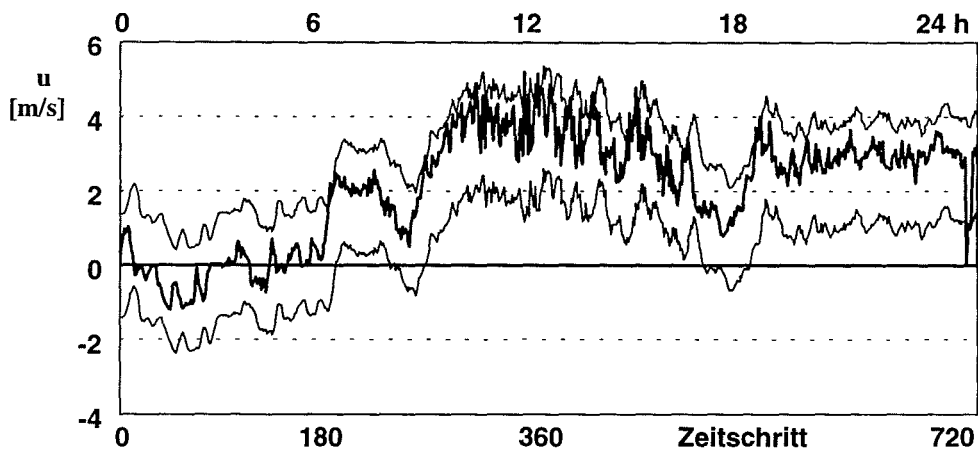


Abb. 6: Am 4. Meßtag registrierte Querwindgeschwindigkeit und Prognosebereich bei AR(5)-Vorhersage über 10 Zeitschritte (95% statist. Sicherheit, zweiseitig).

Bei der zum Vergleich in Abb. 7 gezeigten Prognose nach dem Persistenzverfahren wurde der Sicherheitszuschlag ebenfalls auf eine statistische Sicherheit von 95% eingestellt. Visuell läßt sich erkennen, daß dabei ein breiterer Prognosebereich, als in Abb. 6 entsteht. Die Vorhersage mit dem Persistenzverfahren ist also ungenauer, als die AR(5)-Prognose.

Um die beim Persistenzverfahren eingestellte Breite des Prognosebereiches im weiteren zu verwenden, kann man im AR(5)-Verfahren die statistische Sicherheit auf 97.5% erhöhen.





Zeitschritt Nr.	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
Peristenz-Progn.	4	2	4	4	2	2	2	2	2	0	0	0	2	4	4	6	6	2	2	2
AR(5)-Prognose	20	18	16	14	10	8	6	4	2	2	2	2	2	4	10	12	14	10	8	6

Zeitschritt Nr.	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
Peristenz-Progn.	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	0	4	8	12	2	4	2	2	2	2
AR(5)-Prognose	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	12	16	18	16	12	10	6	4	

Zeitschritt Nr.	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109
Peristenz-Progn.	4	6	10	12	16	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	16	14	14	12	10
AR(5)-Prognose	8	12	16	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

Zeitschritt Nr.	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129
Peristenz-Progn.	12	12	12	14	14	8	4	4	4	8	6	6	6	8	8	12	12	12	6	4
AR(5)-Prognose	20	20	20	20	20	20	18	14	14	16	16	16	18	18	20	20	20	20	20	18

Zeitschritt Nr.	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149
Peristenz-Progn.	6	6	6	4	4	6	4	2	6	6	2	4	8	14	6	4	4	8	8	10
AR(5)-Prognose	16	16	16	14	14	16	12	14	16	14	12	14	16	20	20	18	16	16	18	20

Zeitschritt Nr.	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169
Peristenz-Progn.	10	12	14	14	14	10	8	14	8	8	12	8	6	2	6	4	4	4	8	14
AR(5)-Prognose	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	18	18	16	14	12	12	16	20

Zeitschritt Nr.	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189
Peristenz-Progn.	14	16	16	14	12	12	14	4	2	4	4	4	6	8	10	8	12	10	2	4
AR(5)-Prognose	20	20	20	20	20	20	20	20	16	14	14	12	14	18	20	20	20	20	16	14

Zeitschritt Nr.	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200
Peristenz-Progn.	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AR(5)-Prognose	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## Schlußfolgerungen

Die Zeitserienanalyse hat ergeben, daß die Autokorreliertheit ein wesentliches Charakteristikum der in Form von 2-Minuten-Mittelwerten gegebenen Winddaten ist. Daraus resultierte die Möglichkeit der Modellierung mit einem linearen autoregressiven AR(5)-Modell nach Box & Jenkins (1976). Neben den autokorrelativen bildet dieses Modell auch die spektralen Verhältnisse der Datenserien ab. In Anwendung des AR(5)-Modells läßt sich eine Vorhersagemethode angeben, die jeweils die letzten 5 Meßwerte mit in die Prognose der künftigen Windgeschwindigkeit und ihres Vertrauensbereiches einbezieht. Dadurch finden in der Vergangenheit erfolgte trendartige und zyklische Variationen des Querwindes in der Vorhersage Berücksichtigung. Das AR(5)-Prognoseverfahren stellt gegenüber dem Persistenzverfahren eine Verbesserung dar. Das wurde an folgenden Sachverhalten deutlich:

Das AR(5)-Verfahren liefert eine genauere Vorhersage, so daß sich hier mit einer statistischen Sicherheit von 97.5%, gegenüber 95% beim Persistenzverfahren, arbeiten läßt. Würde man jedoch 95% Sicherheit verwenden, so ließe die AR(5)-Vorhersage eine insgesamt größere wirbelschleppengefährdungsfreie Nutzungszeit zu. Die Parameter der AR-Prognose sind also stets so zu wählen, daß sich ein praktikabler Kompromiß zwischen Sicherheit und Nutzungs-

zeit ergibt. Durch die glättende Wirkung des AR(5)-Modells werden die bei der Persistenzvorhersage auftretenden Sprünge von  $\tau_{\text{frei}}$  vermieden. Diese Eigenschaft trägt wesentlich zur Erhöhung der Akzeptanz des Prognosesystems beim Nutzer (Fluglotsen) bei. Außerdem scheint sie (wie Tab. 4 zeigt) allgemein eine Erhöhung der Nutzungszeit zu bewirken.

Weitere Verbesserungsmöglichkeiten bestehen in einer kontinuierlichen Schätzung der Modellparameter. Dadurch würde sich das Modell stets der aktuellen Situation anpassen. Das bedeutet einerseits, daß veränderte spektrale und autokorrelative Eigenschaften stets neu vom Modell adaptiert werden. Andererseits fließt aber auch ein verändertes Signal-Rausch-Verhältnis in den aktualisierten Parameter  $\sigma_\varepsilon^2$  ein und verändert darüber die Breite des vorhergesagten Konfidenzintervalls.

## Literatur

Box, GEP und Jenkins, GM (1976): „Time series analysis - forecasting and control“, Revised Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Ding Y, Jiang Z (1996): „Study on canonical autoregressive prediction of meteorological element fields“, Acta Meteorologica Sinica, 10(1), 41-51.

Otruba J, Ostrožlik M, Krnác P (1988): „Harmonische Komponenten des Tagesganges der Windgeschwindigkeit unter verschiedenen orografischen Bedingungen“, Contributions of the Geophysical Institute of the Slovak Academy of Sciences. Series of Meteorology, 8, 54-79.

Gordon N (1992): „A new verification scheme for aerodrome forecasts“, Proceedings of the WMO Technical Conference on Tropical Aeronautical Meteorology (TECTAM-92), Geneva, 169-172.

Franke, J-M (1995): „Untersuchungen zur Dynamik von Wirbelschleppen in der atmosphärischen Grenzschicht“, Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover, Band 46.

Ahlbrecht M, Franke J-M, Gurke T, Pertzsch B, Tetzlaff G, Schlink U (1995): „Zwischenbericht zur Fortentwicklung des Prognoseverfahrens des Wirbelschleppen-Warnsystems“, Deutsche Flugsicherung GmbH.

Slutzky, E (1927): „The summation of random causes as the source of cyclic processes“, Econometrica, 5, 105.

Yule, G U (1927): „On a method of investigating periodicities in disturbed series, with special references to Wolfer's sunspot numbers“, Phil. Trans. A., 226, 267.

Korrespondenz bitte an:

Prof. Dr. Gerd Tetzlaff  
 Institut für Meteorologie  
 Universität Leipzig  
 Stephanstraße 3  
 D-04103 Leipzig