



universität  
wien

# DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

Auswertung von Nebel und Hochnebel, sowie Prognose  
mittels logistischer Regression für den Flughafen

Wien - Schwechat

angestrebter akademischer Grad

Magistra der Naturwissenschaften (Mag. rer.nat.)

Verfasserin / Verfasser: Astrid DOBEK  
Matrikel-Nummer: 0104781  
Studienrichtung (lt. Studienblatt): A415 Meteorologie  
Betreuerin / Betreuer: Ass. Prof. Mag. Dr. Manfred Dorninger

Wien, im Mai 2009

*Meiner Familie*

## Zusammenfassung

Nebel birgt schon seit jeher ein hohes Gefahrenpotential in sich, speziell für Verkehrsteilnehmer. Sowohl auf der Straße, zu Wasser oder in der Luft ist er oft auch Ursache für Unfälle. Trotz des Einsatzes modernster Technik verursachen geringe Sichtweiten eine Beschränkung der Kapazität von Flughäfen, was sich in weiterer Folge finanziell, aber auch durch Verspätungen im Flugverkehr auswirkt. Allerdings ist die Vorhersage von Nebel- und Hochnebelbildung eine in der Meteorologie noch nicht zufrieden stellend gelöste Materie.

Obwohl sich zahlreiche Arbeiten mit dieser Thematik beschäftigen, wurden beispielsweise auf dem Gebiet der numerischen Wettervorhersage noch keine befriedigenden Ergebnisse erzielt. Die besten Resultate wurden und werden bis jetzt mit den empirisch ermittelten Erfahrungswerten aus dem operationellen Dienst und statistischen Verfahren erzielt. Dies spricht auch dafür, dass Nebel ein vor allem lokales Phänomen ist und von vielen verschiedenen Parametern und geringfügigen Unterschieden abhängt.

Ziel dieser Arbeit ist es, auf schon vorhandenen Untersuchungen und Problemansätzen aufbauend, eine statistische Vorhersagemethode zu entwickeln, welche die Nebelprognose am Flughafen Wien-Schwechat unterstützen soll.

Halbstündliche METAR Meldungen aus den Jahren 1990 bis 2004 von der Messstelle Wien-Schwechat bilden die Datenbasis. Zuerst wurden die Nebelfälle statistisch untersucht und mit den assoziierten Parametern Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Temperatur, Taupunkt, Jahres-, Uhrzeit und der Nebelbeständigkeit analysiert. Weiters wurde, um eine Abhängigkeit von der bestehenden Wetterlage verifizieren und diese dann in letzter Instanz klimatologisch auszuwerten zu können, die Strömungslagenklassifikation nach Steinacker herangezogen.

Als statistische Vorhersagemethode wurde die logistische Regression verwendet, die sich besonders für dichotome Ereignisse (beispielsweise das Ein- oder Nicht - Eintreten eines Events) eignet. Die berechnete Regression wurde auf unabhängige Daten, bestehend aus METAR Meldungen von den Jahren 2005 bis 2007, angewandt und anschließend mit Verifikationsmaßen ausgewertet. Mit Hilfe dieser Art der Regressionsrechnung können in weiterer Folge für den internationalen Flughafen Wien-Schwechat Nebelwahrscheinlichkeiten prognostiziert werden.

## **Abstract**

Fog has always been a big threat to all kinds of traffic (land, sea and air) and has caused many accidents. Despite the use of modern technology equipment, low visibility still causes degrade airport capacity. This in turn causes financial loss and delays in air traffic. Accurate prediction of fog development and/or low stratus is still not satisfactory up to now.

In spite of numerous theses on this topic, for instance the results concerning numerical forecasts are still not satisfying. Best results are achieved on the basis of operational experience and the use of statistical methods. This indicates that fog is a very regional phenomenon and depends on several parameters and intricacies.

The aim of this thesis was to develop a statistical method of prognosis based on existing studies, which should assist the prediction of fog at Vienna International Airport.

The database consists of METARs of Wien – Schwechat which have been reported every half hour for the period 1990 through 2004. First, all of the incidences of fog were statistically investigated and analyzed together with the associated parameters of, wind direction, wind speed, temperature, dew point, season, time of day and the actual persistence of the fog. In addition Steinacker's flow pattern classification was used to verify the dependence of the prevailing weather situation which then allowed the evaluation of the result climatologically.

The logistic regression was applied as a statistical prognosis method. This is a proper procedure for dichotomous events (for instance appearance and non appearance). The calculated regression was tested on an independent dataset, which contained METARs for the years 2005 to 2007. This data verified that the probability of fog at Vienna International Airport could be prognosticated by means of this regression.

---

Zusammenfassung.....	iii
Abstract.....	1
1 Motivation.....	1
1.1 Einleitung.....	1
1.2 Literatur.....	2
2 Meteorologische Grundlagen des Nebels.....	5
2.1 Feuchte in der Atmosphäre.....	5
2.1.1 Feuchtemaße.....	5
2.1.2 Clausius – Clapeyronsche Gleichung.....	6
2.2 Was ist Nebel?.....	8
2.3 Nebelbildende und nebelauflösende Faktoren.....	9
2.3.1 Nebelbildende Faktoren.....	9
2.3.2 Nebelauflösende Faktoren.....	10
2.4 Nebeltypen.....	10
2.4.1 Strahlungsnebel.....	10
2.4.2 Advektionsnebel.....	11
2.4.3 Orographischer Nebel.....	11
2.4.4 Frontnebel.....	11
2.4.5 Mischungsnebel.....	12
2.4.6 Turbulenznebel.....	12
2.4.7 Hochnebel.....	12
3 Grundlagen aus der Luftfahrt.....	14
3.1 Meteorologische Begriffe aus der Luftfahrt.....	14
3.1.1 METAR – Aerodrome routine meteorological report.....	14
3.1.2 Sichtweite.....	17
3.2 Meteorologische Schwellwerte für den Flugverkehr.....	18
3.2.1 „Visual Flight Rules“ (VFR) und „Instrument Flight Rules“ (IFR).....	19
4 Erste Auswertungen.....	21
4.1 Die Daten.....	21
4.2 Der Nebel.....	21
4.2.1 Definition des Nebels.....	21
4.2.2 Auswertung.....	22
4.2.3 Vergleich mit der Arbeit von A. Strohmayer.....	35
4.3 Tiefer Stratus („Hochnebel“ ).....	36
4.3.1 Definition des „Hochnebels“.....	36

---

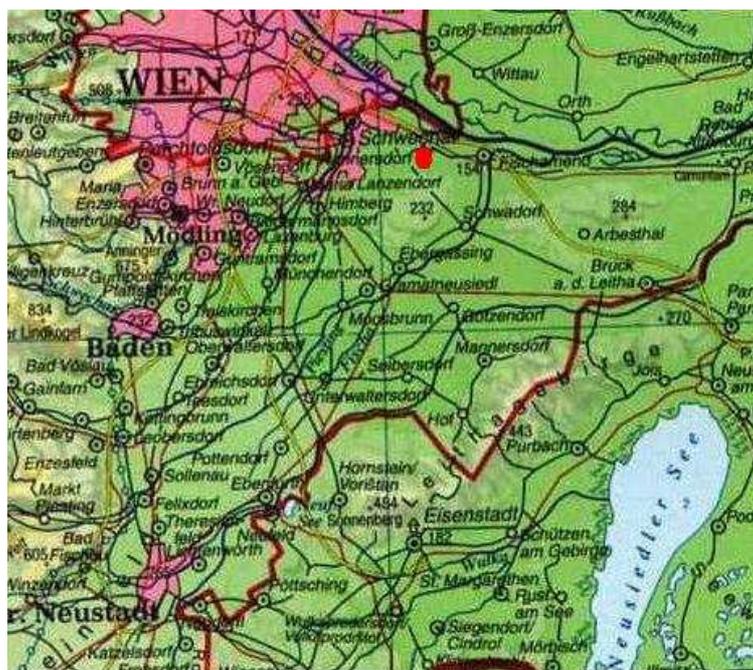
4.3.2	Auswertung.....	37
5	Statistische Vorhersage von Nebel.....	43
5.1	Statistische Vorhersagemethoden .....	43
5.1.1	Lineare und Multiple Regression .....	43
5.1.2	Klassische Methode .....	44
5.1.3	“Perfect Prog” und MOS – Model Output Statistics.....	45
5.2	Die Logistische Regression.....	46
5.2.1	Theorie.....	47
5.2.2	Auswertung der Daten mit einer Logistischen Regression.....	51
6	Verifikation .....	75
6.1	Grundlagen .....	75
6.1.1	Brier Score.....	75
6.1.2	Reliability Diagram .....	76
6.1.3	ROC - Kurve (Relative Operating Characteristic) .....	77
6.1.4	Andere Verifikationsmaße .....	78
6.2	Die Analyse des Nebels .....	81
6.2.1	Brier Score.....	82
6.2.2	Reliability Diagram .....	83
6.2.3	ROC - Kurve .....	85
6.2.4	Andere Verifikationsmaße .....	86
6.3	Die Analyse des Hochnebels .....	89
6.3.1	Brier Score.....	89
6.3.2	Reliability Diagram .....	90
6.3.3	ROC – Kurve.....	91
7	Die Zukunft der Nebelprognose.....	92
	Abbildungsverzeichnis.....	94
	Tabellenverzeichnis.....	97
	Abkürzungsverzeichnis.....	98
	Literaturverzeichnis .....	100
	Danksagung .....	103
	Curriculum vitae .....	104

# 1 Motivation

## 1.1 Einleitung

Der Nebel ist ein unscheinbares, aber dennoch gefährliches Wetterphänomen. Daher interessieren sich für diese Wettererscheinung ebenso viele Menschen wie für spektakuläre Ereignisse, wie beispielsweise Gewitter und Hagel. Für den Meteorologen, der zwar die Grundvoraussetzungen kennt, ist es oft kein leichtes Unterfangen eine Nebelprognose zu erstellen. Trotz zahlreicher Hilfsmittel, die ihm zur Verfügung stehen, erfassen beispielsweise numerische Modelle das Phänomen Nebel nur unzureichend. Aber er ist nicht nur ein Thema der Meteorologie, die Auswirkungen sind für jeden spürbar. Speziell für Verkehrsteilnehmer, sei es auf der Straße, zu Wasser oder in der Luft, birgt Nebel hohes Gefahrenpotential mit sich und ist oft auch Ursache für Unfälle. In dieser Arbeit geht es speziell um die Luftfahrt. Diese reagiert sehr sensibel auf die vom Nebel hervorgerufene Sichtreduktion und letztendlich hat dies auch Auswirkungen auf Kapazitäten und Kapital.

Was die Nebelvorhersage schwierig gestaltet, ist, dass Nebel oft ein sehr kleinräumiges Phänomen ist und deswegen regional unterschiedliche von den verschiedenen Parametern abhängt. In dieser Arbeit wurde das Wiener Becken, speziell der Flughafen Schwechat, der im Südosten von Wien situiert ist, betrachtet.



**Abbildung 1-1 Karte von Wien und des südlichen Wiener Beckens.** Der Flughafen Wien Schwechat ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Quelle: Ed. Hölzel, Hölzel - Weltatlas, 1995, S. 9

An der Vielzahl der bereits existierenden Arbeiten merkt man, wie hoch das Interesse an einer guten Nebelvorhersage ist. Um einen groben Überblick darüber zu schaffen, in welche Richtungen schon geforscht wurde, werden im Weiteren ein paar Werke vorgestellt.

## 1.2 Literatur

Schon 1958 hat *Julius Drimmel* [5] mit einem einfachen Strahlungs-Turbulenz-Modell die Hochnebelbildung beschrieben, wobei es in seiner Arbeit nur um Stratusbildung außerhalb von Schlechtwettergebieten geht. (Er lässt Luftmasse und Advektion außer Acht.) Er hält in seiner Untersuchung *Theorie und Vorhersage der Hochnebelbildung im Wiener Becken* fest, dass im Wiener Becken nur Winde aus dem Südostsektor ( $130^\circ$ ), sowie beständiges Strahlungswetter mit ziemlich stabiler antizyklonaler Witterung und Hochdruckrandlagen in Frage kommen. Außerdem erweist sich ein Hoch über Ost- bzw. Südeuropa mit Föhnkeil über den Alpen (Nordföhn) für Nebelbildung als günstig. Weiters zeigt sich, dass die Feuchte in Bodennähe ebenso ein wichtiger Faktor ist. Je geringer diese ist, desto mächtiger muss die Reibungsschicht und umso höher müssen die mittleren Windgeschwindigkeiten vor Stratusbildung sein. Ein wichtiger Faktor ist natürlich auch die Jahreszeit und die damit verbundene Strahlungsintensität.

Bei der Nebelauflösung sollte man die Drucktendenzen (Bodenanalyse) beachten, so wird etwa längerlebiger Hochnebel praktisch nur durch eine Kaltfront aufgelöst.

Drimmel schließt seine Arbeit mit der Aussage, dass man für bessere Prognosen ein dreistündiges Mittel der relativen Feuchtigkeit und Windgeschwindigkeit in Betracht ziehen müsste. Bis dahin erreiche man mit Hilfe der Bodenanalysen und der Radiosondenaufstiege (Mittagstermin) ein Optimum der Sicherheit.

In numerischen Vorhersagemodellen wird speziell Nebel, oft aber auch Hochnebel nur unzureichend prognostiziert. Speziell im Bereich der Meteorologie wird daran gearbeitet, eine Verbesserung bei der Nebel- und Hochnebelprognose zu erzielen. Einen Beitrag dazu hat *Silke Lichtenauer* [11] mit ihrer Diplomarbeit über *Ortsbezogene Hochnebelvorhersage mit Hilfe eines Limited Area Modells* geleistet. Diese Arbeit untersucht anhand des ALADIN - VIENNA die unzureichende Auflösung des Hochnebels in Modellläufen. Dabei stellt sich heraus, dass die Ursachen dafür vor allem in der Datenassimilation und der Modellphysik der Bewölkung liegen. Inversionen sind nur geglättet wieder gegeben. Mit einem eindimensionalen Modell wird an einer Verbesserung der Modellphysik gearbeitet und damit auch gute Erfolge erzielt. Auch im dreidimensionalen Modell ist nach einer erfolgreichen Testphase das modifizierte Bewölkungsschema implementiert worden.

Für das Klagenfurter Becken und den dort situierten Flughafen haben *Emil Tscherteu* und *Johann Wajboda* [21] eine gute Lösung gefunden, die auch im operationellen Dienst zum Einsatz kommt. Die Arbeit *Nebel im Klagenfurter Becken* beruht auf Aufzeichnungen von Emil Tscherteu und Daten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Analysiert werden die Wintermonate von 1960 bis 1990.

Zuerst werden die Ursachen der unterschiedlichen Nebeltypen, Strahlungsnebel, Advektionsnebel in Bodennähe und Hochnebel untersucht. (in den meisten Fällen Advektionsnebel, wobei folgende Kriterien gelten: eine Bodensicht von mehr als 1000m und ein mehr als 4 Achtel bedeckter Himmel in 30 bis 450m über Grund) Die Beständigkeit wird auch in Kategorien eingeteilt. Weiters wird auf geographische und klimatologische Besonderheiten des Klagenfurter Beckens eingegangen (Wörther-See-Gebiet, Raum Klagenfurt bis St. Veit an der Glan, über Völkermarkt bis Bleiburg). Im Vergleich zu anderen Flughäfen zeigt sich Klagenfurt als Kältepol mit gleichzeitig höchsten Feuchtwerten.

Tscherteu und Wajboda werten die folgenden Faktoren als die wichtigsten zur Nebelbildung und –auflösung aus:

- *Jahreszeit*
- *Wetterlage* (Druckverteilung)
- *Höhenströmung* nach Richtung und Geschwindigkeit
- *Bodenwind* nach Richtung und Geschwindigkeit
- *Windscherungsverhältnisse* zwischen Boden und ca. 800hPa
- *Temperatur* im Nebelbereich
- *vertikaler Temperaturgradient* (Labilität)
- *Feuchtigkeitsangebot* (Bodenfeuchte und Feuchteadvektion)
- *Strahlungsbilanz* (Einfluss der Bewölkung)
- *vertikale Mächtigkeit* der Nebelschicht
- *horizontale Erstreckung*

Nach genauen Untersuchungen bezüglich der Bildung, Auflösung und des Verhaltens wird eine Punktetabelle ausgearbeitet. Diese ist für die Monate November bis Februar (die „Hochsaison“) anwendbar. Je nach Erhaltungsneigung in den einzelnen Kategorien werden Plus- sowie Minuspunkte verteilt. Bei der praktischen Anwendung werden aus der Tabelle die Punkte entnommen und summiert. Daraus ergeben sich Auflösungszeiten. Da allerdings nicht alle Parameter gemessen werden können und sie zum Teil berechnet werden müssen, kann man diese Methode als gute Richtlinie heranziehen, sollte sie aber dennoch kritisch betrachten.

Für den Flughafen Linz Hörsching arbeitet *Manfred Hofko* [7] in einem Projekt mit einer ähnlichen Methode wie bei *Tscherteu* und *Wajboda*. Sie beinhaltet auch ein Punktesystem. Das zeigt, dass ein bereits existierendes Verfahren für einen Ort nicht eins zu eins auf einen anderen Ort übertragen werden kann, sondern wieder mit aufwendigen Auswertungen neu angepasst werden muss.

Aber auch schon für den Flughafen Wien Schwechat hat *Eva Maria Müllauer* [14] hinsichtlich Nebelprognosen einen ersten Ansatz in ihrer Diplomarbeit *On the Predictability of Low Visibility Conditions at Vienna Airport* gemacht. Das Ziel war herauszufinden, unter welchen Bedingungen sich RVR Werte (Runway Visual Range - Pistensichtweiten) rasch und stark reduzierten. Konkret werden Tendenzen untersucht, bei denen die Sichtweiten innerhalb einer Stunde von über 1500m auf Werte unter 500m reduzierten. Parameter wie Spread (Differenz zwischen Lufttemperatur und Taupunkt), Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Wolken und Bodenfeuchte werden untersucht und daraus auf die „idealen Bedingungen“ geschlossen, welche Müllauer ebenso in weiterer Folge analysiert. Das Ergebnis dieser Arbeit ist, dass nur in 20% aller „idealen Bedingungen“ auch wirklich eine schnelle und starke reduzierte Sichtweite aufgetreten ist. Diese Arbeit zeigt, wie schwierig es ist Nebel zu prognostizieren und wie sensibel die Atmosphäre auf scheinbar gleiche Bedingungen reagiert. Betont wird auch die Notwendigkeit des weiteren Forschungseinsatzes in dieser Thematik.

Generell zeigt sich, dass mit Hilfe statistischer Verfahren gute Erfolge erzielt werden. Ein Beispiel ist die Arbeit von *Wolfgang von Bezold* *Eine objektive Vorhersagemethode für geringe Sichtweiten auf statistischer Grundlage* [3] für den Flughafen München. Der Schwerpunkt liegt darin, aus aktuellen Messungen am Flughafen und an nahe gelegenen Stationen auf den weiteren Wetterverlauf zu schließen. Nach der Überprüfung seiner Methode stellt er fest, dass die Ergebnisse nicht befriedigend sind, aber dennoch für Prognosen von Nutzen sind.

Nach der Durchsicht diverser Arbeiten erscheint es sinnvoll an einem statistischen prognoseunterstützenden Tool zu arbeiten, welches zwar dem Synoptiker die Arbeit nicht abnimmt, aber zumindest mit weiteren Informationen helfend zur Seite steht.

## 2 Meteorologische Grundlagen des Nebels

Die in diesem Kapitel verwendeten Informationen stammen hauptsächlich aus den Büchern *G.H.Liljequist und K. Cihak, Allgemeine Meteorologie, 2006* [12], *H. Kraus, Die Atmosphäre der Erde, 2004* [10] und *Lehrbuch der Experimentalphysik Bergman Schaefer, Bd.7 Erde und Planeten, 2001* [1].

### 2.1 Feuchte in der Atmosphäre

Die Atmosphäre der Erde setzt sich aus den Hauptgasen Stickstoff (N<sub>2</sub>) zu 78%, Sauerstoff (O<sub>2</sub>) zu 21% und Argon (Ar) zu 0,9% zusammen, sowie aus Spurengasen (vgl. Lehrbuch der Experimentalphysik, Bergman Schaefer, Bd.7 Erde und Planeten, [1], S.701).

Ein weiterer wichtiger Bestandteil unserer Luft ist Wasserdampf. Dieser ist sehr variabel verteilt und sein Anteil liegt bei 0% bis 4%. Das Bemerkenswerte ist, dass Wasser in allen drei Aggregatzuständen (fest - Eis, flüssig - Wasser und gasförmig - Wasserdampf) in der Atmosphäre vorkommt. Außerdem spielt Wasserdampf bei vielen meteorologischen Phänomenen wie Wolkenbildung, Niederschlag, Tau, Reif, Nebel und ähnlichen Erscheinungen eine entscheidende Rolle. Nicht zu vergessen ist auch die energetische Wirksamkeit bei Strahlungsemission und -absorption durch Wasserdampfmoleküle (vor allem im infraroten Bereich).

#### 2.1.1 Feuchtemaße

Folgende **Feuchtemaße** sind in der Meteorologie am häufigsten gebräuchlich:

- **Dampfdruck**  $e$ : ist der Partialdruck [Pa] des Wasserdampfes.
- **Sättigungsdampfdruck**  $e_s$ : ist der Maximalwert des Dampfdruckes und ist eine Funktion der Temperatur  $e_s = e(T)$ . Von Untersättigung spricht man bei  $e < e_s$ , von Sättigung wenn  $e = e_s$  und von Übersättigung wenn  $e > e_s$ . Bei Übersättigung kommt es zu Kondensation. Man unterscheidet zwischen Sättigungsdampfdruck über Wasser und solchem über Eis.
- **Relative Feuchte**  $f$ : ist definiert als  $f = \frac{e}{e_s} * 100$ , wobei  $0 \leq f \leq 100\%$ . In der Atmosphäre können die 100% nur vernachlässigbar überschritten werden, man spricht dann von Übersättigung.
- **Taupunkt**  $T_d$ : ist jene Temperatur, auf die man ein Luftpaket abkühlen muss, um es zur Kondensation zu bringen. Dabei nimmt  $f$  Werte bis zu 100% an,  $e$  bleibt konstant und  $e_s(T)$  sinkt. Somit kommt man auf  $e_s(T_d) = e$ .

Ist  $e_s(T)$  der Sättigungsdampfdruck über Eis, so heißt die analoge Temperatur **Frostpunkt**  $T_f$ .

- **Spread:** ist die Differenz zwischen der Lufttemperatur und dem Taupunkt und wird in °C angegeben.
- **Spezifische Feuchte**  $q$ : gibt das Verhältnis der Masse von Wasserdampf und feuchter Luft wieder. Die spezifische Feuchte wird in der Einheit g/kg angegeben, wobei die Werte in einem Bereich von 0 bis 30g/kg liegen.
- **Mischungsverhältnis**  $m$ : ist definiert als  $m = \frac{Q_w}{Q_L}$ , dabei ist  $Q_w$  die Dichte des reinen Wasserdampfes und  $Q_L$  die des reinen Luftanteils. Mischungsverhältnis und spezifische Feuchte können leicht ineinander umgerechnet werden. Dabei bewegen sich beide zahlenmäßig im selben Bereich.

### 2.1.2 Clausius – Clapeyronsche Gleichung

Mit der Clausius – Clapeyronsche Gleichung wird die Sättigungsdampfdruckkurve beschrieben. Dabei geht man von den chemischen Potentialen der Gibbsschen Form aus.

$$\mu = e + p\alpha - Ts = h - Ts \quad (2.1)$$

Beziehungweise das Differential des chemischen Potentials:

$$d\mu = \alpha dp - s dT \quad (2.2)$$

Dabei ist  $e$  die *spezifische Energie*,  $p$  der *Druck*,  $\alpha$  das *spezifische Volumen*,  $T$  die *Temperatur*,  $s$  die *spezifische Entropie* und  $h$  die *spezifische Enthalpie*.

Befinden sich flüssige und gasförmige Phase im Gleichgewicht, so gilt für die Gesamtheit der Änderung der chemischen Potentiale ( $\mu^g$  ist das chemische Potential des Wasserdampfes und  $\mu^f$  ist das chemische Potential des Wassers):

$$d(\mu^g - \mu^f) = 0 \quad (2.3)$$

Dieser Ansatz gilt für jeden Phasenübergang und beschreibt den Zustand im dem Phasengleichgewicht herrscht. Werden die chemischen Potentiale,  $\mu^g$  und  $\mu^f$ , als Funktion des Druckes und der Temperatur betrachtet so folgt:

$$\underbrace{\frac{\partial \mu^g(p,T)}{\partial p}}_{=\alpha^g} dp + \underbrace{\frac{\partial \mu^g(p,T)}{\partial T}}_{=-s^g} dT - \underbrace{\frac{\partial \mu^f(p,T)}{\partial p}}_{=\alpha^f} dp - \underbrace{\frac{\partial \mu^f(p,T)}{\partial T}}_{=-s^f} dT = 0 \quad (2.4)$$

Durch Umformen wird daraus:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{s^g - s^f}{\alpha^g - \alpha^f} \quad (2.5)$$

Für die Phasenübergang Wasser – Dampf, aber auch Dampf – Eis, ist  $\alpha^f$  (mit  $1\text{m}^3/1000\text{kg}$ ) um vieles kleiner als  $\alpha^g$  (mit  $1\text{m}^3/1\text{kg}$ ) und kann daher vernachlässigt werden. Mit Hilfe der Gasgleichung  $p\alpha = RT$  kann daher das spezifische Volumen für Wasserdampf umgeschrieben werden in:

$$(\alpha^g - \alpha^f) \cong \alpha^g = \frac{RT}{p} \quad (2.6)$$

Dabei ist  $R$  die *individuelle Gaskonstante des Wasserdampfes*.

Über die *Phasenumwandlungswärme*  $L = T \frac{\Delta S}{\Delta M}$  kann der zweite Term auf der rechten Seite der Gleichung (2.5) geschrieben werden als:

$$(\alpha^g - \alpha^f) = \frac{L}{T} \quad (2.7)$$

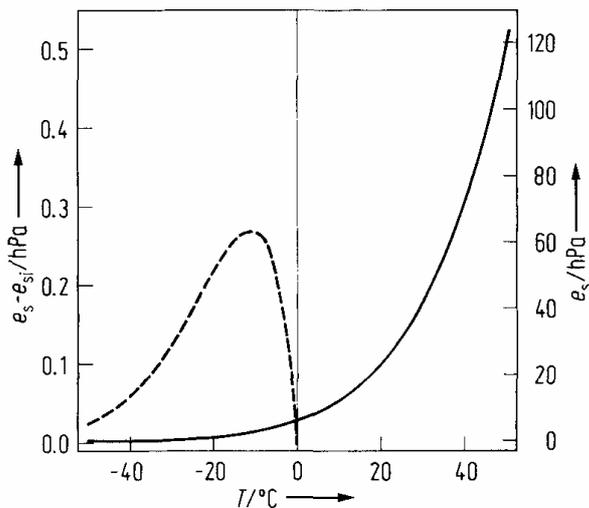
Der *Sättigungsdampfdruck* ist jener Druck, bei dem Wasser und Wasserdampf dasselbe *chemische Potential* besitzen und daher wird statt  $p$  die Bezeichnung für den *Sättigungsdampfdruck*  $e_s$  verwendet. Dieser hängt nur von der Temperatur ab.

Das Endergebnis der Clausius – Clapeyronschen Gleichung als Differentialgleichung beziehungsweise in der integrierten Form lautet:

$$\frac{de_s}{e_s} = \frac{L}{R_w} \frac{dT}{T^2} \rightarrow e_s(T) = e_s(T_0) \exp \left[ \frac{L}{R_w} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.8)$$

Bei der integrierten Form ist die Temperaturabhängigkeit der *Phasenumwandlungswärme*  $L$  vernachlässigt.

Der *Taupunkt*  $T_d$  ist jene Temperatur, bei der Wasser und Wasserdampf dasselbe *chemische Potential* besitzen.  $T_d$  hängt nur von dem Druck ab.



**Abbildung 2-1 Sättigungsdampfdruckkurve** (durchgezogen über Wasser, gestrichelt über Eis)  
Quelle: Erde und Planeten, Bergmann Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 7 [1]

In Abbildung 2-1 ist die Sättigungsdampfdruckkurve dargestellt, mit  $e_s$  dem Sättigungsdampfdruckes über einer ebenen Wasseroberfläche (die durchgezogene Linie) und dem über Eis (linke Ordinate und gestrichelte Kurve). Das chemische Potential lässt sich mit der Abhängigkeit von Temperatur und Druck als zweidimensionale Fläche darstellen. Die Sättigungsdampfdruckkurve ist die Schnittlinie dieser Oberfläche des chemischen Potentials für Wasser und der davon verschiedenen für Wasserdampf. An der Kurve ist flüssiges Wasser und Wasserdampf im Gleichgewicht. Durch erhöhen oder

senken des Druckes oder der Temperatur tritt Kondensation oder Verdunstung ein.

Über der Sättigungskurve ist Wasser in der flüssigen Phase, unter ihr ist es Wasserdampf.

## 2.2 Was ist Nebel?

„Wenn die Kondensation oder Sublimation des Wasserdampfes in den Luftschichten an oder nahe der Erdoberfläche erfolgt, entsteht feuchter Dunst oder Nebel“ (Allgemeine Meteorologie, S.137 [12])

Also ist Nebel genau genommen nur eine spezielle Wolkenform, die sich durch Kondensation oder Sublimation des Wasserdampfes in den Luftschichten nahe dem Erdboden bildet. Es müssen ähnliche Voraussetzungen herrschen wie auch bei der Wolkenbildung.

Nebel bewirkt eine Verschlechterung der Sichtweite. Wird in Augenhöhe die Grenze von 1000m unterschritten, so meldet ein Beobachter **Nebel**, dabei wird das Symbol  $\equiv$  verwendet. Enthält der Nebel Eiskristalle anstatt Nebeltröpfchen, so spricht man von **Eisnebel** mit dem Symbol  $\leftrightarrow$ . Manchmal liegt die Obergrenze des Nebels unterhalb der Augenhöhe und dann wird **tiefer Nebel**  $\underline{\underline{-}}$  angegeben. Kommt es zu einer Reduktion der Sichtweite auf einen Wert zwischen 1000 und 2000m, so wird dies als **feuchter Dunst**  $\equiv$  bezeichnet. Allerdings muss man Nebeldunst von **trockenem Dunst**  $\infty$  unterscheiden, da der trockenere nicht von den Feuchtigkeitsverhältnissen abhängt, sondern durch die Streuung

des Lichtes an in der Atmosphäre schwebenden Teilchen entsteht. Außerdem kann feuchter Dunst als Nebelvorzeichen gedeutet werden, während dies bei trockenem Dunst nicht der Fall ist.

Bei Nebel bewegt sich die Tröpfchengröße in einem Bereich von etwa 5µm bis zu 50µm. Umso dichter und nässender der Nebel ist, desto größer sind auch die Tröpfchen. Der Wassergehalt im Nebel beträgt etwa 0,01 bis 0,30 g/m<sup>3</sup>. Die Mächtigkeit des Nebels kann sehr variabel sein und geht von ganz „seichten“ und flachen bis zu dicken Nebelfeldern, welche eine vertikale Ausdehnung von 700 bis 800m erreichen können.

## 2.3 Nebelbildende und nebelauflösende Faktoren

Wolken, und somit auch Nebel, entstehen durch Kondensation oder Sublimation des Wasserdampfes an Kondensationskernen in der Luft. Bei der Wolkenbildung wird zumeist durch Hebung die Luft unter den Taupunkt abgekühlt.

### 2.3.1 Nebelbildende Faktoren

#### Abkühlung der Luft unter den Taupunkt

- Starker Strahlungsverlust führt zu einer Abkühlung des Bodens. Tiefe Luftschichten geben Wärme an den Boden ab und werden so unter den Taupunkt abgekühlt, *Strahlungsnebel*.
- Durch Überströmen einer kühleren Unterlage wird durch Turbulenz und Strahlung Wärme an die Erdoberfläche übertragen, die Luft wird unter den Taupunkt abgekühlt, *Advektionsnebel*.
- Strömt Luft einen Hang hinauf so wird sie adiabatisch abgekühlt, *Orographischer Nebel*.

#### Zufuhr von Wasserdampf und gleichzeitige Abkühlung durch Mischung mit kälterer Luft

- Durch Verdunstung von Regentropfen, die wärmer als die umgebende Luft sind, entsteht beispielsweise *Frontnebel*.
- Durch Verdunstung bei Meeren, Seen oder anderen Wasserläufen, die wärmer als die Luft sind, entsteht beispielsweise *Seerauch*.
- Durch turbulenten Transport von Wasserdampf in vertikaler Richtung.

## 2.3.2 Nebelauflösende Faktoren

### Auflösung durch Erwärmung

- Die Erdoberfläche erwärmt sich durch Absorption der Sonnenstrahlung.
- Nebel strömt über eine wärmere Unterlage.
- Luft strömt einen Hang herab und wird dadurch adiabatisch erwärmt.
- Gegenstrahlung durch Aufzug mittelhoher Wolken.

### Auflösung durch Entzug des Wasserdampfes

- Schneefall durch Nebel: Dadurch werden der Luft durch Sublimation an den Schneekristallen Wasserdampf und dem Nebel durch Koagulation Tropfen entzogen.
- Durch Kondensation an kaltem Regen, einer kalten Unterlage oder schneebedecktem Boden kann der Nebelluft Wasserdampf entzogen werden.

### Auflösung durch turbulente Durchmischung

Dadurch hebt sich oft der Nebel vom Boden weg und es bildet sich eine Stratuswolke.

## 2.4 Nebeltypen

Nebelarten werden zumeist in Hinblick auf ihre Entstehung unterteilt.

### 2.4.1 Strahlungsnebel

Strahlungsnebel ist ein lokaler Effekt und entsteht oft in Jahreszeiten, in denen der Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht besonders ausgeprägt ist, also zum



**Abbildung 2-2 Strahlungsnebel**, der sich gerade auflöst. Quelle: Walch (1989)

Beispiel bei herbstlichen Schönwetterlagen. Wichtige Voraussetzungen sind, dass der Himmel fast klar, es sehr windschwach und die unterste Luftschicht feucht ist. Meist findet man Strahlungsnebel in Senken, da dort diese Bedingungen oft vorherrschen, sowie in der Nähe von Gewässern, da diese ein Feuchtereservoir sind und so die Umgebungsluft mit Feuchte anreichern. Regen erhöht auch das Feuchtepotential in der Luft. Ein nasser Boden fördert die Nebelbildung. Klart es nach dem Regen auf, so kann es am Abend stark abkühlen und die Voraussetzung für Nebelbildung ist somit gegeben.

Im Allgemeinen ist Strahlungsnebel nicht besonders mächtig und wird durch die Sonneneinstrahlung tagsüber aufgelöst. Auch ist der Wasserdampfgehalt und der Radius der Tröpfchen relativ gering.

### **2.4.2 Advektionsnebel**

Besonders wenn im Winter feuchte Warmluft über einen kalten Boden strömt, entsteht Advektionsnebel. Dieser ist eine der mächtigsten Nebelformen und zeigt auch praktisch keinen Tagesgang. Auch ist der Advektionsnebel sehr beständig und kann über Tage liegen bleiben. Im Gegensatz zu Strahlungsnebel ist hier ein kräftiger Wind nebelfördernd, da er die Luftmassen weiter transportiert. Allerdings kann es auch durch den stärkeren Wind zu einer Erhöhung der Turbulenz kommen und der Nebel kann zeitweise vom Boden abheben.

Advektionsnebel wird in Küstengebieten oft auch als Meernebel bezeichnet, da dieser dort durch die unterschiedliche Erwärmung von Meer und Land entstehen kann.

In vielen Fällen bezeichnet man Nebel, der von einem Ort advehiert wird, ebenso als Advektionsnebel.

### **2.4.3 Orographischer Nebel**

Strömt Luft einen Hang hinauf, so wird sie bei diesem Vorgang adiabatisch abgekühlt. Wird dabei das Kondensationsniveau erreicht, bildet sich der so genannte orographische Nebel. Zu Beginn der Hebung sollte die Schichtung relativ stabil sein, da es sonst zu Konvektion kommen würde. In den meisten Fällen bildet sich Hangnebel, allerdings kann bei niedrigem Kondensationsniveau der Nebel auch den Talboden erreichen. Dann spricht man von Talnebel.

Oftmals kann man orographischen Nebel und Advektionsnebel nicht eindeutig voneinander trennen, da sie gern in Mischform auftreten.

Bedingt durch das Absinken der Luftmassen an der Leeseite von Gebirgen (Nebeltropfen verdunsten), tritt Nebel in diesen Bereichen wesentlich seltener auf und daher sind diese Gebiete „Nebelunauffällig“. Während es dagegen an der Luvseite zu Hebung kommt, welche zu Kondensation führt, ist dort somit die Nebelhäufigkeit stärker ausgeprägt. Ist die Schichtung allerdings feucht labil, induziert dies eher Regen- und/oder Schneeschauer.

### **2.4.4 Frontnebel**

Bei einer Luftmassengrenze, einer Front, liegt die kältere (dichtere und schwerere) Luftmasse unter der wärmeren. Ist die Temperatur der Regentropfen nun wärmer als die Lufttemperatur der kälteren Luftmasse, so verdunsten diese und führen der kälteren Luft Wasserdampf zu. Dabei sinkt die Wolkenuntergrenze deutlich ab. Sie kann soweit absinken, dass sie den Boden erreicht - Nebel entsteht. Diese Erscheinung ist allerdings relativ

kurzlebig, da dieser Frontnebel, wie der Name schon sagt, nur im Zuge einer Front auftritt. Generell entsteht Frontnebel häufiger bei Warm- als bei Kaltfronten. Begünstigt wird diese Erscheinung, wenn die Kaltluft unter der Frontfläche schon sehr feucht ist, was zumeist im Winterhalbjahr der Fall ist.

### 2.4.5 Mischungsnebel

Bei dieser Form mischt sich eine relativ feuchte kältere Luft mit einer relativ feuchten wärmeren Luftmasse. Oft entsteht Mischungsnebel im Bereich von Seen, wo die Temperatur des Wassers deutlich wärmer als die Lufttemperatur ist. Die Luftschicht direkt über dem Wasser wird erwärmt und durch Verdunstung mit Wasserdampf angereichert. Dies führt zu einer Labilisierung und zu einem Aufsteigen der wärmeren Luft in Form von Blasen. Durch



Abbildung 2-3 Seenebel in der Arktis.

Quelle: Walch (1989)

die Vermischung der wärmeren und kälteren Luft kommt es zu Kondensation und man sieht den See „rauchen“.

Die Labilisierung führt oftmals zu Konvektion, es bildet sich „Seerauch“ und etwas weiter darüber liegen tiefe konvektive Wolken.

Im Sommer kann man oft nach Durchzug einer Kaltfront ein „Rauchen von Straßen und Wäldern“ beobachten.

### 2.4.6 Turbulenznebel

Bei dieser Art von Nebel handelt es sich meist um eine Stratuswolke, die sich dem Erdboden nähert und oft in Verbindung mit einer Warmfront auftritt. In einer gewissen Schicht herrscht ein Maximum an Wasserdampf und es folgt ein vertikaler Nettotransport von Wasser in Richtung Boden. Normalerweise wirkt sich Turbulenz in der Grenzschicht nebelauflösend aus.

### 2.4.7 Hochnebel

Insbesondere im Winter, bei Hochdrucklagen, wird häufig „nebeliges Wetter“ beobachtet. Dabei beträgt die Sicht meist mehr als 1km. Hochnebel ist meteorologisch gesehen gar kein Nebel, sondern eine tiefe Bewölkung an einer abgehoben Inversion. Es handelt sich um eine Stratus- oder Stratocumulus - Bewölkung, wobei die Untergrenze oft nur knapp über dem Beobachter liegt und die Obergrenze nur einige hundert Meter bis 2000m über dem Erdboden zu finden ist. Es handelt sich also um Bewölkung in der atmosphärischen Grenzschicht. Bei diesen Wetterlagen ist es in tiefen Lagen nebelig trüb, kalt, und oft fällt ein

leichter Nieselregen aus diesen tiefen Wolken. Im Mittelgebirgsniveau und in alpinen Lagen ist es hingegen bei diesen Wetterlagen meist sonnig und warm.



**Abbildung 2-4** „Nebelsuppe“,  
seichter Hochnebel  
Quelle: Walch (1989)

Über der Inversion kommt es zum Absinken trockener Luftmassen und unterhalb herrschen gut durchmischte Bedingungen vor. Diese wirken gegeneinander und somit ist die Folge ein Absinken oder Ansteigen des Hochnebels.

Oft bildet sich auch aus Nebel Hochnebel. Kommt es nachts über zum Beispiel zu Strahlungsnebel, und wird der Boden in der Früh an den Rändern des Nebels durch die Sonneneinstrahlung erwärmt, so löst sich dieser Strahlungsnebel vom Boden her durch turbulente

Durchmischung auf und es entsteht eine Form des Hochnebels.

## 3 Grundlagen aus der Luftfahrt

So wie für die meisten Verkehrsteilnehmer ist auch in der Luftfahrt die Sichtweite eine sehr entscheidende Größe, wobei der Flugverkehr die stärkste Abhängigkeit von den vorherrschenden Wetterbedingungen aufweist. Dieses Kapitel soll einen kleinen Einblick in den Zusammenhang zwischen Meteorologie und Luftfahrt geben.

Die Grundlage für dieses Kapitel bildet *Aerodrome Reports and Forecasts, a User Handbook to the codes* der *WMO* [24], sowie die Lehrbücher *Meteorology* [8] und *Operational Procedures* [9] von *Jeppesen*.

### 3.1 Meteorologische Begriffe aus der Luftfahrt

#### 3.1.1 METAR – Aerodrome routine meteorological report

An Flugplätzen werden halbstündlich Wettermeldungen abgesetzt und zwar immer um XX:20 und um XX:50. Diese sind wie folgt aufgebaut:

*Typ des Reports (METAR)/ Flugplatz/ Datum und Zeit/ Wind/ Sichtweite/ RVR/ aktuelles Wetter/ Bewölkung/ Temperatur und Taupunkt/ Druck/ vergangenes Wetter/ Wind shear/ Remarks/ Trend/ Bodenzustand der Runways.*

Die wichtigsten Parameter werden im Folgenden kommentiert, die Sichtweite und RVR werden allerdings im nächsten Abschnitt eigenständig behandelt.

- **Flugplatz:** wird im ICAO 4 Letter Code angegeben. Jeder Flugplatz, egal ob international oder lokal, hat eine eigene Kennung. Für Wien ist das zum Beispiel *LOWW* (Linz: *LOWL*, Salzburg: *LOWS*, Klagenfurt: *LOWK*, Graz: *LOWG* und Innsbruck: *LOWI*)
- **Datum und Zeit:** Als Datum wird jeweils nur der Tag des aktuellen Monats angegeben, danach die Zeit in UTC (Universal Time Coordinated) mit einem z gekennzeichnet. Als Beispiel *291250z* bedeutet am 29. um 12:50 UTC.
- **Wind:** Richtung und die Geschwindigkeit werden gemeldet. Die Windrichtung wird in 10° Intervallen eingeteilt, wobei 360° als Nordwind definiert wird. Die Geschwindigkeit bezieht sich immer auf die letzten 10 Minuten vor der Beobachtung und kann in km/h,

kt oder m/s angegeben werden, die Einheit wird im Code immer mit angeführt. Außerdem wird sie zweistellig angegeben (für höhere Geschwindigkeiten gibt es Zusätze). In Österreich wird grundsätzlich in kt gemeldet.

- **VRB** bedeutet, dass der Wind variabel ist. Dabei kann es sich um sehr kleine Windgeschwindigkeiten handeln (unter 3kt) oder um höheren Windgeschwindigkeiten, die mit einer Winddrehung größer gleich 180° verbunden sind.
  - **„V“** kennzeichnet einen „variierenden Wind“, das heißt die Windrichtung ist in dem 10 Minuten Intervall nicht eindeutig einer einzelnen Himmelsrichtung zuzuweisen. Voraussetzung hierfür ist eine Winddrehung zwischen 60° und maximal 180°, bei einer Windgeschwindigkeit von mehr als 3kt.
  - **„G“** heißt Gust (Böe) und wird gemeldet, wenn in dem 10 Minuten Intervall Böen beobachtet werden, die die mittlere Windgeschwindigkeit um mehr als 10kt übersteigen.
  - **Calme** meint, dass es windstill ist. In dem Fall wird 00000kt gegeben (sowohl Richtung als auch Geschwindigkeit werden gleich Null gesetzt).
- **Sichtweite, RVR und Vertikalsicht** werden unter Punkt 3.1.2 besprochen.
  - **Aktuelles Wetter:**

Bezeichnungen		Wettererscheinungen		
<i>Intensität</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Niederschlag</i>	<i>Sichtbehinderung</i>	<i>Andere</i>
-... leicht ... mäßig (ohne Angabe) +... stark	<b>MI</b> ... seicht <b>BC</b> ... Schwaden <b>PR</b> ... teilweise	<b>DZ</b> ... Nieseln <b>RA</b> ... Regen <b>SN</b> ... Schnee <b>SG</b> ... Schneegrieseln	<b>BR</b> ... feuchter Dunst <b>FG</b> ... Nebel <b>FU</b> ... Rauch <b>VA</b> ... Asche (Vulkan) <b>DU</b> ... Staub <b>SA</b> ... Sand <b>HZ</b> ... trockener Dunst	<b>PO</b> ... Staubwirbel <b>SQ</b> ... Böen <b>FC</b> ... Trichterwolke (z.B.: Tornado) <b>SS</b> ... Sandsturm <b>DS</b> ... Staubsturm
<b>VC</b> ... in der Umgebung des Flugplatzes (innerhalb 8km)	<b>DR</b> ... treiben <b>BL</b> ... wehen <b>SH</b> ... Schauer <b>TS</b> ... Gewitter <b>FZ</b> ... gefrierend	<b>IC</b> ... Eiskristalle <b>PE</b> ... Eiskörnchen <b>GR</b> ... Hagel <b>GS</b> ... Graupel		

Tabelle 3.1 Elemente der Wettererscheinungen eines METAR – Codes, Quelle: Jeppesen [8]

damit sind die Wetterphänomene zum Beobachtungszeitpunkt am Flugplatz selbst oder in dessen Umgebung gemeint. Diese werden in Abkürzungen gemeldet und deren Intensität beschrieben. In Tabelle 3.1 sind alle verwendeten Codewörter zusammengefasst, aus welchen jede Kombination möglich. Es können auch mehrere Ereignisse gleichzeitig gemeldet werden, jedoch maximal drei.

- **Bewölkung:** der Bedeckungsgrad und die Höhe der Basis werden jeweils dreistellig angegeben. Wobei der Bedeckungsgrad in *FEW* (few 1/8 bis 2/8), *SCT* (scattered 3/8 bis 4/8), *BKN* (broken 5/8 bis 7/8) und *OVC* (overcast 8/8) unterteilt wird. Die Höhe wird meist in hft gemeldet, bis 10000ft (3000m) in 100ft (30m) Schritten und darüber in 1000ft (300m) Schritten. Das Wort *CAVOK* bezieht sich sowohl auf die Sichtweite, als auch auf die Bewölkung. Für ein „Cloud And Visibility OK“ (*CAVOK*) Ereignis muss die Sicht 10km oder mehr betragen, es darf keine Bewölkung unter 5000ft (1500m), kein CB und kein signifikantes Wetterphänomen auftreten. Zusätzlich gibt es noch die Codewörter *SKC* („wolkenlos“), *NSC* (wenn *CAVOK* und *SKC* nicht zutreffen, aber keine besondere Bewölkung beobachtet wurde) und *NCD* (wenn durch einen automatischen Wolkendetektor keine Bewölkung erfasst wurde).

Es werden bis zu vier Bewölkungsgruppen gemeldet, dabei ist allerdings zu beachten, dass damit nicht die Stockwerke der Wolken im meteorologischen Sinn gemeint sind.

- **erste Gruppe:** tiefste Bewölkungsschicht
- **zweite Gruppe:** nächst höhere Bewölkungsschicht mit einem höherem Bedeckungsgrad als 2/8 (nur *SCT*, *BKN* oder *OVC*)
- **dritte Gruppe:** nächst höhere Bewölkungsschicht mit einem Bedeckungsgrad der größer als 4/8 ist (nur *BKN* oder *OVC*)
- **zusätzliche Gruppe:** signifikante konvektive Wolken, also CB (Cumulonimbus) und TCU (Cumulus Congestus, beziehungsweise abgeleitet von dem Ausdruck „towering Cumulus“). Diese vierte Gruppe wird nur dann verwendet, wenn in den ersten drei Gruppen die vorhandenen CB oder TCU noch nicht erwähnt wurden.

Ist der Himmel bedeckt, kann noch zusätzlich die *Vertical Visibility* angegeben werden, welche durch *VV* gekennzeichnet wird. Diesem Code folgt der jeweilige Wert, welcher in 30m Schritten gemeldet wird.

- **Temperatur und Taupunkt:** werden jeweils zweistellig und immer auf ganze Grad gerundet angegeben. Bei negativen Temperaturen wird ein *M* davor gesetzt. Beispielsweise wird  $-9^{\circ}\text{C}$  als *M09* angegeben.
- **Druck:** es wird prinzipiell der QNH (der am Platz gemessene Wert reduziert auf Meeresniveau) mit der Einheit hPa verwendet. Er wird vierstellig ohne Komma angegeben. Ein QNH von 995,6hPa wird als *Q0995* geschrieben. Wird der Druck in Inch angegeben, so wird anstatt einem *Q* ein *A* vermerkt.
- **Ergänzende Informationen:** damit ist unter anderem das Nachwetter gemeint, welches mit *RE* gekennzeichnet wird und nur wichtige Erscheinungen enthalten soll.
- **Trend:** Grundsätzlich wird der Trend nur angegeben, wenn am Beobachtungsort auch ein Meteorologe anwesend ist. Es gibt für alle beobachteten Parameter vorgegebene Schwellwerte. Wird eine Überschreitung der Schwellen in den folgenden zwei Stunden erwartet, so gibt man die Art der Änderung an. Ein *BCMG* (becoming – „wird“) oder ein *TEMPO* (temporary - zeitweise) leitet diese Gruppe ein. Weiteres gibt es noch zeitliche Beschränkungen wie *FM* (from - von), *TL* (until - bis) oder *AT* (at - um). Bei keiner signifikanten Änderung wird *NOSIG* (no significant change) vermerkt.

### 3.1.2 Sichtweite

Die Sichtweite ist jene meteorologische Größe, an der der Nebel fest gemacht wird. Außerdem ist sie in der Flugmeteorologie ein entscheidender Parameter, wie in Abschnitt 3.2 noch näher erläutert wird. Aus diesem Grund wird hier unter einem eigenen Punkt noch genauer darauf eingegangen.

In der Luftfahrt unterscheidet man zwischen verschiedenen Sichtweiten, in einem METAR werden die folgenden zwei angeführt.

- **Meteorologische Sichtweite:** ist jene horizontale Entfernung, bei der ein Beobachter mit normaler Augenstärke ein dunkles Objekt erkennen kann. In der Nacht wird diese Beobachtung mit Lichtern durchgeführt, wobei die Stärke der Lichter bekannt sein muss.

Variiert die Sichtweite in den verschiedenen Himmelsrichtungen oder fluktuiert sie stark, so wird die schlechteste beobachtete Sichtweite angegeben. Kommt ein Sensor zur Sichtweitenbestimmung zum Einsatz, so wird im METAR nach der Sichtweite ein *NDV* angeführt, was „no directional variation“ bedeutet.

Ist die horizontale Sichtweite in den unterschiedlichen Richtungen nicht gleich groß und unterscheidet sich die geringste Sichtweite von der vorherrschenden um 50%,

beziehungsweise ist die schlechteste Sichtweite geringer als 1500m, so wird eine eigene Gruppe mit dieser Sichtweite und der dazugehörigen Himmelsrichtung, unterteilt in die acht Haupthimmelsrichtungen, angegeben.

Grundsätzlich wird die Sichtweite vierstellig mit den folgenden Schwellwerten verschlüsselt:

- Bis 800m wird auf die nächsten 50m gerundet.
  - Zwischen 800m und 5000m wird auf die nächsten 100m gerundet.
  - Zwischen 5000m und 9999m wird auf die nächsten 1000m gerundet.
  - Wird 9999 gemeldet, so beträgt die Sicht über 10km.
- **Runway Visual Range (RVR):** ist die maximale Entfernung in Pistenrichtung (Blickrichtung des Piloten bei Landung oder take-off) in der Höhe von 15ft über Grund, in der noch Markierungen erkannt werden können. Bei Nacht wird die Pistenbefeuerung verwendet.

Die RVR ist kein routinemäßiger Bestandteil eines METAR. Sie wird angegeben, wenn die meteorologische Sichtweite einen Wert unter 1500m annimmt. Es kann für bis zu vier Pisten eine Pistensichtweite angegeben werden.

Eingeleitet wird diese Gruppe mit einem *R* als Kennzeichnung, danach folgt die zweistellige Kennung der Piste, gefolgt von einem *,*, dann wird die mittlere RVR (über 10-minütiges Beobachtungsintervall) vierstellig angegeben. Lässt sich innerhalb dieses Beobachtungszeitraumes eine eindeutige Tendenz (dabei muss das Mittel der ersten fünf Minuten um 100m oder mehr vom Mittel der zweiten fünf Minuten abweichen) feststellen, so wird an die Sichtweite noch ein *U* (für upward, entspricht einer Verbesserung), ein *D* (für downward, entspricht einer Verschlechterung) oder einem *N* (für keine ausgeprägte Änderung) angehängt. Steht nach der Sichtweite kein Buchstabe, so war es nicht möglich eine Tendenz festzustellen. Wie bereits bei der meteorologischen Sichtweite kann auch eine signifikante Variation der RVR gemeldet werden. Dabei muss während des 10-minütigen Beobachtungszeitraumes ein 1-minütiger mittlerer Extremwert um 50m oder um 20% des Mittels abweichen.

Bewegt sich die Pistensichtweite außerhalb des Messbereiches des Beobachtungssystems, so wird dies mit einem *P* (Wert über der Obergrenze) oder einem *M* (Wert unter der Untergrenze) gekennzeichnet.

## 3.2 Meteorologische Schwellwerte für den Flugverkehr

„Schlechte“ Wetterbedingungen beeinflussen die Möglichkeit der Verkehrsteilnehmer in der Luft. Deswegen gibt es einige Bestimmungen, die als Mindestbedingung erfüllt sein müssen.

### 3.2.1 „Visual Flight Rules“ (VFR) und „Instrument Flight Rules“ (IFR)

Grundsätzlich unterscheidet man zwei „Möglichkeiten“ des Fliegens, und zwar unter Sichtflugbedingungen (VFR) und unter Instrumentenflugbedingungen (IFR). Speziell für VFR – Flieger, aber auch für IFR muss ein gewisses Minimum an Wetterbedingungen (VMC – Visual Meteorological Conditions) vorherrschen, um einen sicheren Flug sowie take-off und Landung zu gewährleisten. Wie der Name VFR schon sagt, navigiert der Pilot mit dem, was er sieht, bzw. muss Gefahren, wie zum Beispiel Berge, auch rechtzeitig mit seinen Augen erkennen können. Er muss auch eine gewisse Distanz zu Bergen, Wolken, Häusern und auch anderen Gefahrenmomenten einhalten. VMC muss nicht nur am Startflughafen, sondern auch am Zielflughafen erfüllt sein, beziehungsweise muss je nach Wettergeschehen ein passender Ausweichflugplatz (Alternate) gewählt werden.

Hat nun ein Pilot eine Instrumentenflugberechtigung und ein entsprechendes Flugzeug, so kann er auch bei schlechteren Wetterbedingungen fliegen. Für ihn gelten die meteorologischen Minimumbedingungen IMC (Instrumental Meteorological Conditions).

Weiters gibt es noch die Möglichkeit mit einer speziellen Genehmigung VFR zu fliegen, selbst wenn keine VMC vorherrschen, dies wird Special VFR genannt. Aber auch hierfür gibt es meteorologische Mindestbedingungen. Ist nun die Sicht schlechter beziehungsweise die Wolkenuntergrenze tiefer, so heißt es *No special VFR (NSV)*.

VMC Visual meteorological conditions	VIS = 5000m UND Ceiling = 1500ft
IMC Instrumental meteorological conditions	5000m > VIS = 1500m ODER 1500ft > Ceiling = 700ft
NSV No special vfr	VIS < 1500m ODER Ceiling < 700ft

**Tabelle 3.2** Meteorologische Mindestbedingungen für Sicht- und Instrumentenflug

Die Grenzwerte, die erfüllt sein müssen, sind aus Tabelle 3.2 zu entnehmen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass mit *VIS* die meteorologische Sichtweite und mit *ceiling* die Höhe der Wolkenuntergrenze (mit einem Bedeckungsgrad von größer gleich 5/8) gemeint ist.

#### 3.2.1.1 „Low Visibility Procedure“ (LVP)

Wenn die Sicht schlechter beziehungsweise die Wolkenuntergrenze tiefer ist, so fliegt man unter „*Low Visibility*“ Bedingungen. Voraussetzung, um unter diesen Umständen zu fliegen, ist allerdings, dass sowohl der Flughafen als auch das Flugzeug inklusive Crew für diese

Konstellationen ausgerüstet und zugelassen sind. Dabei unterscheidet man zwischen drei Kategorien (I – III, wobei die dritte Kategorie noch zusätzlich in drei unterteilt wird). In Tabelle 3.3 sind alle drei Kategorien mit ihren Bedingungen aufgelistet.

Kategorie	RVR / Bewölkung (geltende Mindestbedingungen)	Decision height	Separation (in nautischen Meilen)
LVP I / CAT I	1200m $\geq$ RVR > 550m ODER Base $\leq$ 300ft	Nicht tiefer als 200ft	3nm
LVP II / CAT II	550m $\geq$ RVR > 350m ODER Ceiling $\leq$ 200ft	unter 200ft, aber nicht tiefer als 100ft	5nm
CAT IIIA	350m $\geq$ RVR > 200m	Unter 100ft	7nm
LVP III / CAT IIIB	200m $\geq$ RVR > 50m	Unter 50ft	7nm
CAT IIIC	keine Beschränkung	keine Beschränkung	7nm

**Tabelle 3.3** Einteilung der Low Visibility Kategorien beim Anflug Quelle: Jeppesen [9]

Die *Separation* ist der für jede Kategorie notwendige Mindestabstand, der bei Landung und take – off zwischen den Flugzeugen eingehalten werden muss (1nm entspricht 1,82km).

*Base* und *ceiling* beziehen sich auf die Wolkenuntergrenze, wobei sich *base* auf jede Bewölkung ab 1/8 Bedeckungsgrad bezieht. Die „*Decision Height*“ ist jene Höhe, in der während eines Anfluges die Landebahn ausreichend gesehen werden muss. Ist dem nicht so, dann kann der Anflug noch ohne Schwierigkeiten abgebrochen werden.

Fallen meteorologische Bedingungen und *Decision Height* des Flugplatzes nicht in dieselbe Kategorie, so gilt die höhere.

Am Flughafen Schwechat können die Flugzeuge mit einem minimalen Abstand von 2nm anfliegen. Sobald „*Low Visibility*“ Bedingungen herrschen, müssen größer Distanzen eingehalten werden, ab LVP I zumindest 3nm, ab LVP II zumindest 5nm und ab LVP III zumindest 7nm. Daraus ist leicht ersichtlich, dass mit schlechteren Wetterbedingungen auch die Kapazität des Flugplatzes deutlich eingeschränkt wird und daher auch wirtschaftliche Aspekte eine wesentliche Rolle spielen.

Demzufolge ist eine gute und genaue Wetterprognose sowohl für den Piloten als auch für die Flugsicherung, weiters für Fluglinien und Passagiere von hohem Interesse und großer Bedeutung.

## 4 Erste Auswertungen

Kernpunkt dieses Kapitels bilden statistische Auswertungen von Auftrittswahrscheinlichkeiten des Nebels und die dafür notwendigen meteorologischen Bedingungen. Dabei wurden die einzelnen Parameter in Nebel- sowie Hochnebelfälle unterteilt und separat analysiert.

### 4.1 Die Daten

Dieser Arbeit liegen METAR – Daten (detaillierte Beschreibung siehe Kapitel 3) vom Flugplatz Wien Schwechat aus den Jahren 1990 bis 2004 zu Grunde. Dieser Datensatz umfasst insgesamt 255628 Meldungen und bildet somit eine genügend große Stichprobe um statistische Auswertungen und Aussagen treffen zu können.

Um eventuelle Fehler und Unsicherheiten des Datensatzes zu eliminieren, war es vorerst notwendig, diesen auf Vollständigkeit und Qualität zu untersuchen. Mit 97,2% war eine ausreichende Zahl an Meldungen erfasst worden.

Auf Grund von Archivierungsproblemen (nicht alle Meldungen waren konsistent, Meldungen wurden mehrfach protokolliert) war es nötig, den Datensatz zu korrigieren und zu bearbeiten. Die Meldungen wurden in jährliche und monatliche Perioden unterteilt, um größere Datenlücken zu entdecken und einen guten Überblick zu schaffen. Lediglich in fünf von den vorhandenen 180 Monaten sind größere Intervalle mit fehlenden Werten aufgetreten. Der Monat mit den meisten Fehlwerten ist der Oktober 1997, da in diesem Zeitraum keine einzige Beobachtung archiviert wurde. Im Weiteren weisen folgende Monate auch noch größere Abweichungen vom Soll auf:

- im Juni 1996 sind 49,24% der Daten vorhanden.
- im November 1997 sind 31,39% der Meldungen,
- im Februar 1998 sind 69,79% der Daten,
- im Oktober 2000 sind nur 21,03% der Meldungen im Datensatz vorhanden.

### 4.2 Der Nebel

#### 4.2.1 Definition des Nebels

In der Meteorologie ist der Nebel mit einer meteorologischen Sichtweite unter 1000m eindeutig definiert (Liljequist, 2006 [12]). Allerdings kann Nebel in seltenen Fällen auch außerhalb dieses Grenzwertes gemeldet werden, beispielsweise wenn Nebelschwaden oder nur ganz seichte Nebelfelder beobachtet werden. In der Flugmeteorologie werden diese als

BCFG (fog patches – Nebelschwaden), VCFG (Nebel in der unmittelbaren Umgebung) oder als MIFG (shallow fog – seichter Nebel) bezeichnet. Nebelschwaden sind ebenso interessant und relevant wie „herkömmlicher“ Nebel, da diese einerseits auf einer Piste durch Advektion zu einer raschen Sichtreduktion führen können und andererseits oft Vorboten eines massiveren Nebelfeldes sind. Da aus bereits älteren Studien bekannt ist, dass advehierter Nebel im Wiener Becken eine vorherrschende Rolle spielt, ist die Konsequenz aus dieser Erfahrung, dass auch Nebel in der Umgebung als Zeichen für eine bald eintretende Nebelsituation gedeutet werden kann. Aus diesem Grund werden alle Meldungen, bei denen der Beobachter einen Nebel gemeldet hat und dies im METAR mit *FG* (Nebel), *BCFG* (Nebelschwaden), *VCFG* (Nebel in unmittelbarer Umgebung), *PRFG* (partieller Nebel), *FZFG* (gefrierender Nebel), *FZBZFG* (gefrierende Nebelschwaden) und *FZPRFG* (gefrierender partieller Nebel) vermerkte, als Nebelfälle bezeichnet. Die einzige Ausnahme bildet *MIFG*: Diese sind Nebelfelder, die sich nur ganz seicht über dem Boden befinden, sich oftmals in den frühen Morgenstunden bilden und nach kurzer Zeit wieder auflösen. Da diese Form des Nebels praktisch keine Auswirkung auf die Sichtweite hat und somit keine Einschränkung für den Flugverkehr darstellt, werden diese Fälle im Folgenden hier nicht berücksichtigt.

## 4.2.2 Auswertung

In Tabelle 4.1 sind die Anzahl der Tage mit Nebel pro Jahr beziehungsweise Monat angeführt. Es ist für jeden Monat ein mittlerer, maximaler sowie minimaler Wert angegeben. Als Nebeltag wird hier jeder Tag bezeichnet, an dem in einem Zeitraum von 00:00 UTC bis 24:00 UTC zumindest eine Nebelmeldung auftrat.

	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember	Jahr
Mittelwert	9,47	4,80	3,60	2,13	1,73	0,87	0,67	1,47	3,40	8,93	8,47	7,87	52,80
MAX	19	10	8	5	4	4	2	6	15	19	17	13	75
MIN	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	29

**Tabelle 4.1 Anzahl der Nebeltage pro Monat.** Mittelwert entspricht dem Mittel über die Jahre 1990 bis 2004 aller im jeweiligen Monat aufgetretener Nebeltage, MAX (MIN) entspricht der maximal (minimal) Anzahl an Tagen mit Nebelvorkommnissen im jeweiligen Monat innerhalb der 15 Jahre.

Mit durchschnittlich 9,5 Tagen, was etwa einem Drittel des Monats entspricht, treten im Jänner die häufigsten Nebelereignisse auf. Setzt man die Jahresmaxima in Relation, so liegt der Jänner (1997), aber auch der Oktober (1995), mit jeweils 19 Tagen im Spitzenfeld. Weiters wurden über die 15 Jahre in fast jedem Monat zumindest in einem Jahr kein einziges Mal Nebel gemeldet, mit Ausnahme des Jäanners, März und Dezembers, in denen jedes Jahr zumindest einmal ein Nebelfall verzeichnet worden ist. Auch in diesem Bereich weist der

Jänner die höchste Anzahl an Tagen auf, da in jedem betrachteten Jahr zumindest an vier Tagen Nebel verzeichnet wurde.

An zweiter Stelle steht der Oktober, gefolgt von den Monaten November und Dezember, die ebenfalls sowohl einen hohen Mittelwert, als auch einen hohen Maximalwert aufweisen.

Das Minimum an Nebeltagen wird in den Sommermonaten, mit dem absoluten Minimum im Juli, belegt. In der gesamten Stichprobe, die betrachtet wurde, treten im Juli nie mehr als zwei Nebeltage auf. Damit ist ein eindeutiger Jahrgang des Auftretens der Nebelhäufigkeit feststellbar.

Um die Anzahl der Nebeltage zu relativieren, ist in der Tabelle 4.2 die Anzahl der Nebelmeldungen aufgelistet. Aus diesen beiden Tabellen, kann man auf die Beständigkeit des Nebels innerhalb eines Monats schließen.

	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember	Jahr
<b>Mittelwert</b>	122,73	49,60	26,07	12,40	6,80	2,73	2,80	5,40	19,93	90,50	77,13	103,20	513,27
<b>MAX</b>	279	170	61	51	32	13	14	29	125	299	182	174	837
<b>MIN</b>	17	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	13	263

**Tabelle 4.2 Anzahl der Meldungen mit Nebel.** Mittelwert entspricht der durchschnittlichen Anzahl von Nebelmeldungen innerhalb eines bestimmten Monats über die 15 Jahre. MAX (MIN) ist die maximal (minimal) aufgetretene Anzahl an Nebelmeldungen innerhalb eines Monats.

Mit durchschnittlich 123 Meldungen pro Jahr kristallisiert sich auch hier der Jänner als „nebelreichster“ Monat heraus. Im Jänner sind 10% aller möglichen Meldungen Nebelfälle. Aber auch der Oktober ist ein nebelanfälliger Monat, allerdings mit einer höheren Schwankungsbreite als der Jänner, was durch die Extremwerte belegt wird. Dabei sticht der Oktober 1995, in dem 299 Nebelmeldungen verzeichnet wurden (was in etwa 20% aller möglichen Meldungen entspricht) als Monat mit den meisten Nebelmeldungen heraus. Die beiden Extremwert (19 Nebeltage und 299 Nebelmeldungen) wurden jeweils im Oktober 1995 vermerkt.

Wie auch schon bei den Nebeltagen tritt das absolute Minimum dagegen auch bei den Nebelmeldungen in den Sommermonaten (Juli) auf.

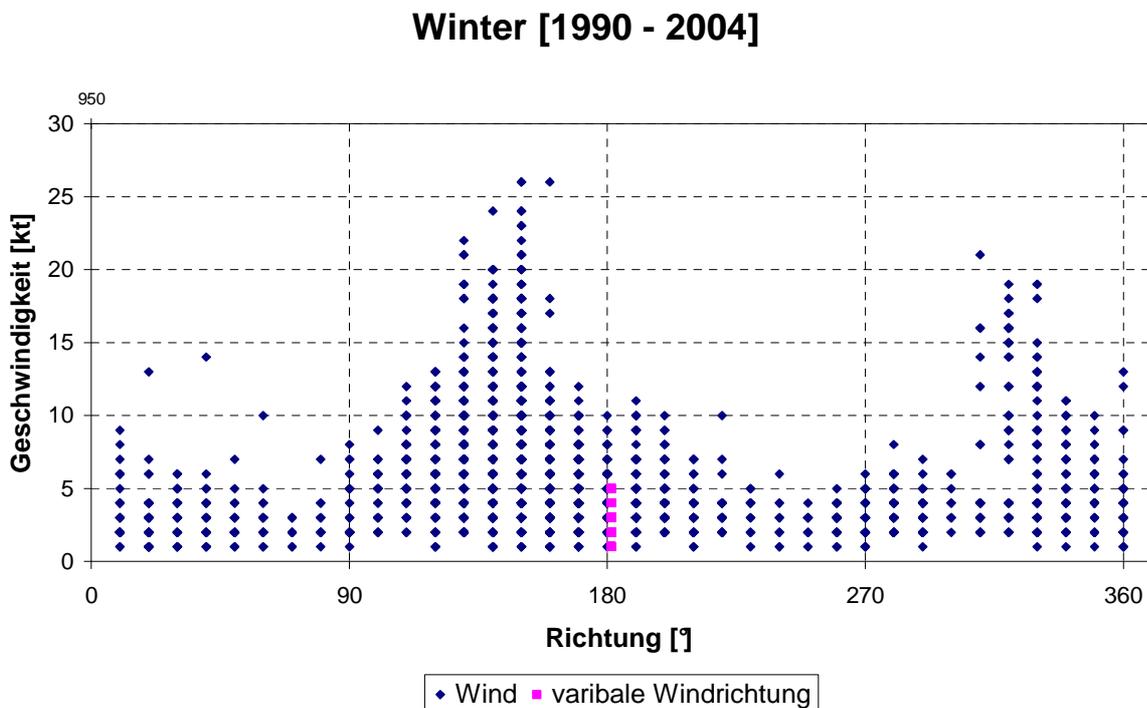
Um ein besseres Verständnis über die Nebelsituation am Flughafen Schwechat zu erlangen und in Hinblick auf ein prognoseunterstützendes Tool, waren die Auswertung einzelner Parameter wie Wind, Temperatur, Tageszeit und Strömungslagen erforderlich.

#### 4.2.2.1 Wind

Für den Flughafen Wien Schwechat ist die Tatsache, dass der Wind eine entscheidende Rolle spielt, bereits bekannt (Müllauer, 2006[14]). Dass Nebel im Wiener Becken nicht nur

bei ruhigen Wetterlagen auftritt, ist ein Faktum, das den meisten Meteorologen im operationellen Dienst bekannt ist.

Doch wie hoch darf die Windgeschwindigkeit wirklich sein, damit Nebel auftreten kann? Ist die Auftrittswahrscheinlichkeit bei allen Windrichtungen und Jahreszeiten gleich hoch? Alle Nebelfälle der 15 Jahre wurden in die Jahreszeiten Winter (Dezember, Jänner, Februar), Frühling (März, April, Mai), Sommer (Juni, Juli, August) sowie Herbst (September, Oktober, November) unterteilt. Für jede Jahreszeit wurde eine Verteilung der Windrichtungen mit den Windgeschwindigkeiten erstellt, dabei zeigte sich, dass die höchsten Windgeschwindigkeiten bei Nebel im Winter, gefolgt vom Herbst und Frühling, vermerkt werden. Im Sommer tritt Nebel überwiegend bei einer Windgeschwindigkeit unter 5kt auf, was in etwa 18km/h entspricht.



**Abbildung 4-1** Verteilung der Windrichtung gegen die Windgeschwindigkeit im Fall von Nebel in den Wintermonaten.

Betrachtet man die Abbildung 4-1, in der für den Winter jeweils die Windrichtungen gegen die Windgeschwindigkeiten aufgetragen wurden, tritt bei jeder Windrichtung Nebel auf. Man kann also allein von der vorherrschenden Windrichtung nicht auf das Auftreten von Nebel schließen, beziehungsweise diese ausschließen.

Diese Darstellung zeigt, dass selbst bei Windgeschwindigkeiten über 25kt (entspricht rund 47km/h), was der Beaufort Skala Stufe 6 „starker Wind“ entspricht, Nebel möglich ist.

Allerdings erkennt man auf den ersten Blick, dass dies nicht bei jeder Windrichtung der Fall ist. Das Maximum wird bei Südostwinden erreicht, aber auch bei einer Nordwest - Komponente. Der Südostwind wird dadurch erklärt, dass aus Feuchtereservoirs wie den Auen, dem Neusiedler See, aber auch aus der Ungarischen Tiefebene, Feuchte, manchmal auch schon Nebelfelder, herantransportiert werden. Durch den leichten Höhenanstieg Richtung Wien kondensiert die Feuchte. Hingegen kann der Nebel mit nordwestlichen Richtungen mit Frontdurchgängen in Verbindung gebracht werden. Dies wird auch mit der Lebensdauer des Nebels gestützt. So sind Nebellagen mit Südostwind langlebig und beständig, während ihre Lebensdauer bei Nordwestwind eher kurz ist. Tatsächlich ausschließen kann man Nebel bei gewissen Windrichtungen nur ab einer Windstärke von über 5kt.

Für weitere Untersuchungen sind die Windrichtungen in 14 Intervalle eingeteilt worden, dabei sind die Windrichtungen in 30° Abschnitte, beginnend über Nord, eingeordnet und die Variablen und Calmen jeweils einer eigenen Gruppe zugeteilt worden. Die unten angeführten Bezeichnungen für die einzelnen Klassen werden auch in den folgenden Abbildungen übernommen:

- W1: 350° bis 10° → entspricht der Windrichtung Nord
- W2: 20° bis 40°
- W3: 50° bis 70°
- W4: 80° bis 100° → entspricht der Windrichtung Ost
- W5: 110° bis 130°
- W6: 140° bis 160°
- W7: 170° bis 190° → entspricht der Windrichtung Süd
- W8: 200° bis 220°
- W9: 230° bis 250°
- W10: 260° bis 280° → entspricht der Windrichtung West
- W11: 290° bis 310°
- W12: 320° bis 340°
- W13: alle Variablen → nach METAR Definition siehe Kapitel 3.1.1.
- W14: alle Calmen

Zu beachten ist, dass im METAR der Wind nur in 10° Schritten angegeben wird und daher mit dieser Unterteilung alle Meldungen erfasst werden.

Um die Häufigkeiten der Nebellagen bei bestimmten Windgeschwindigkeiten und bei gewissen Windrichtungen näher zu untersuchen, wurden die Windgeschwindigkeiten in 3 Klassen, angelehnt an die Beaufort Skala, eingeteilt.

- 1 bis 3kt → Stufe 1 „*leichter Zug*“
- 4 bis 6kt → Stufe 2 „*leichter Wind*“
- Alles über 6kt → alle anderen Stufen zusammengefasst

Calmen werden bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt, da diese mit der Windgeschwindigkeit 0kt angegeben werden. Allerdings werden die variablen Windrichtungen sehr wohl ausgewertet, da diese auch immer mit einer Windgeschwindigkeit in Verbindung stehen. Hier ist zu beachten, dass im METAR Variabel nicht nur bei geringen Windgeschwindigkeiten gegeben wird, sondern in Abhängigkeit von der Winddrehung innerhalb des Beobachtungszeitraumes (siehe dazu Kapitel 3.1.1).

Die Häufigkeiten der Windgeschwindigkeitsklassen, die der jeweiligen Windrichtung zugeordnet werden, können der Abbildung 4-2 entnommen werden. Summiert man die Prozentsätze jeder einzelnen Windrichtung, so kommt man auf 100%. Dabei zeigt sich, dass in den meisten Fällen der höchste Prozentsatz an den „*leichten Zug*“ geht.

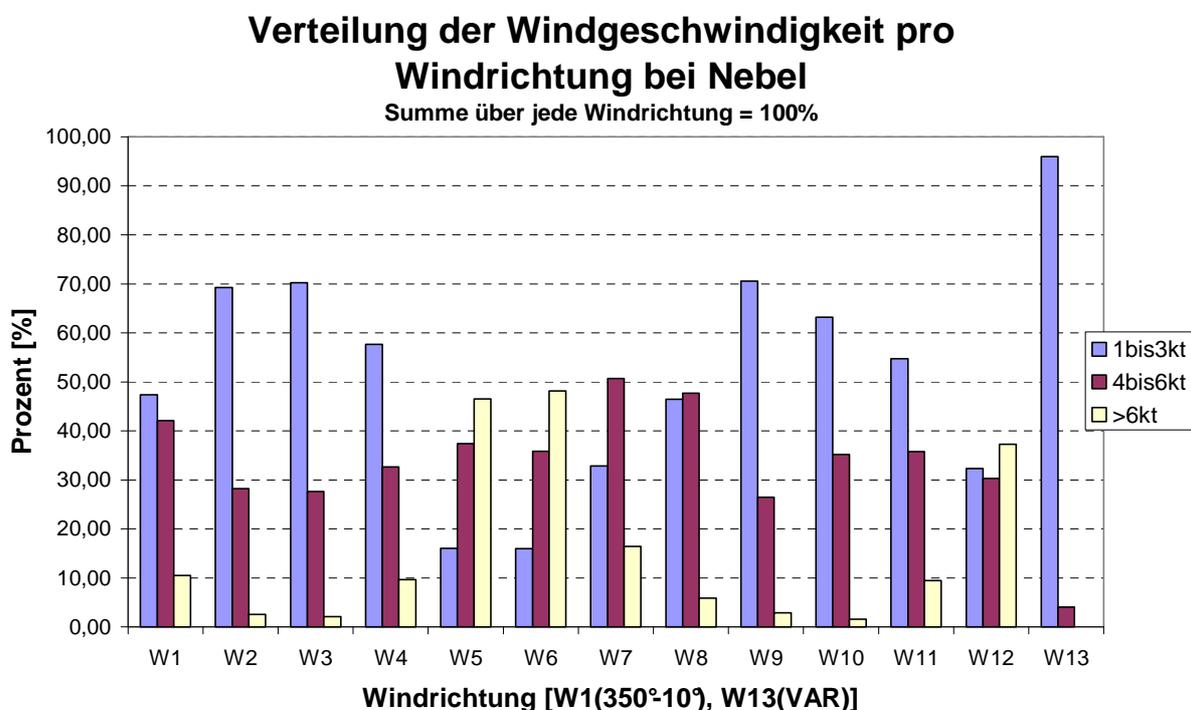


Abbildung 4-2 Prozentuelle Verteilung der Windgeschwindigkeit pro Windrichtung im Fall von Nebel.

In den Klassen W7 (170° bis 190°) und W8 (200° bis 220°) entfällt jedoch der höchste Prozentwert an den „*leichten Wind*“. In der Klasse W12 (320° bis 340°) sind die Prozentsätze ziemlich ausgeglichen, wobei das Maximum in der Kategorie „über 6kt“ erreicht wird. Dies lässt darauf schließen, dass sich bei Nordwestwind Frontnebel bildet. Ein eindeutiges Maximum im Bereich von „über 6kt“ entfällt auf die Klassen W5 (110° bis 130°) und W6 (140° bis 160°). Diese Windrichtungen entsprechen für den Flughafen Wien – Schwechat jenen des klassischen Advektionsnebels.

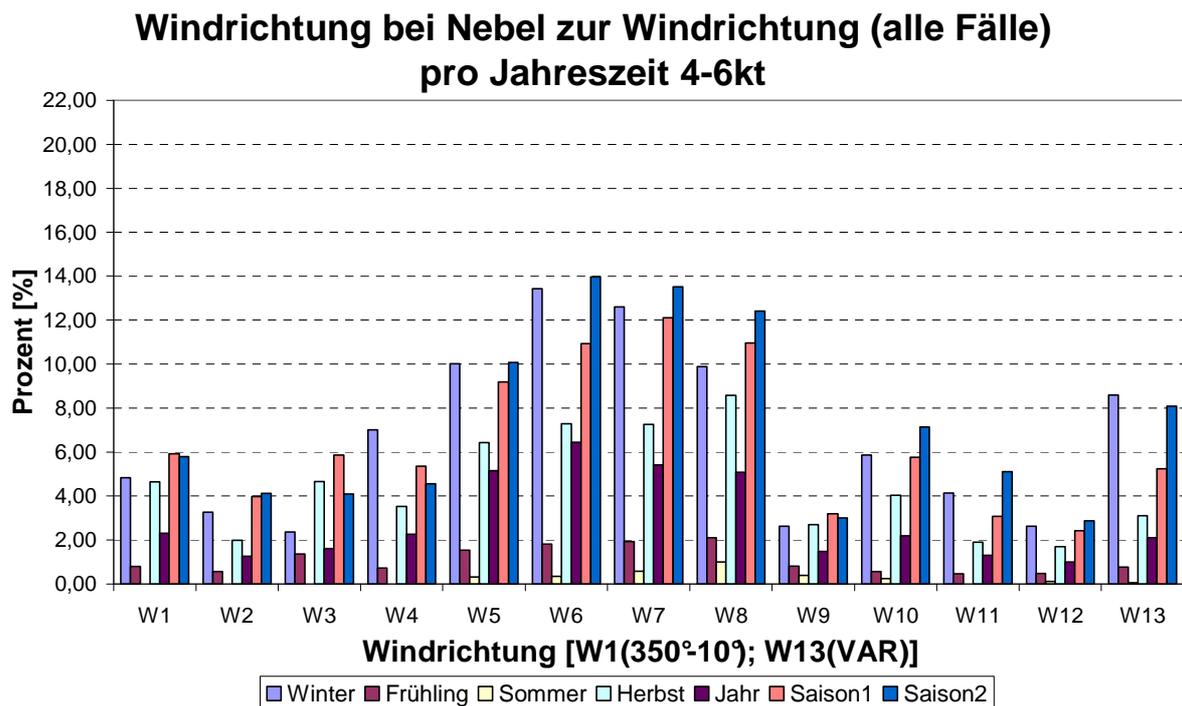
Diese Graphik muss allerdings mit Vorsicht betrachtet werden, da es hier nur um Nebelfälle geht und sie keine Wahrscheinlichkeitsaussage über das Auftreten von Nebel liefert. Vergleicht man die Häufigkeit einer Windrichtung mit der Häufigkeit des gleichzeitigen Auftretens von Nebel, ergibt sich ein anderes Bild. So ist, über das ganze Jahr gesehen, bei einer Windrichtung von Nordwest gerade einmal in 1% der Fälle, bei einer Windgeschwindigkeit von über 6kt auch wirklich Nebel aufgetreten. Um Tendenzen besser herausfiltern zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit Auswertungen für die einzelnen meteorologischen Jahreszeiten sowie für zwei übergeordnete Saisonen erstellt:

- *Winter*: Dezember, Jänner & Februar
- *Frühling*: März, April & Mai
- *Sommer*: Juni, Juli & August
- *Herbst*: September, Oktober, & November
- *Saison1*: Oktober, November & Dezember
- *Saison2*: November, Dezember & Jänner

Da es vier nebelreiche Monate, nämlich Oktober, November, Dezember und Jänner gibt, wurden zwei Saisonen definiert, um die Vergleichbarkeit mit den anderen Jahreszeiten, die jeweils aus drei Monaten zusammen gesetzt sind, zu gewährleisten. Aber auch die Verteilung über das gesamte Jahr ohne jahreszeitliche Unterscheidungen ist enthalten (entspricht der Bezeichnung „*Jahr*“).

Die Abbildungen sind für jede Windgeschwindigkeitsklasse erstellt worden, im Folgenden werden die aussagekräftigsten angeführt. In Abbildung 4-3 ist die Klasse „4kt bis 6kt“ dargestellt.

Erkennbar ist, dass im *Sommer* in diesem Windgeschwindigkeitsbereich kaum Nebel auftritt. Während in den Hauptsaisonen die Wahrscheinlichkeit, dass bei südlichem bis südöstlichem Wind Nebel zustande kommt, bei fast 14% liegt.



**Abbildung 4-3** Prozentuelle Verteilung der Windrichtung bei Nebel in den Jahreszeiten. 100% entspricht allen Meldungen pro Jahreszeit und Windrichtung.

Beide *Saisonen* haben sehr ähnliche Verläufe, allerdings hat die *Saison2* einen tendenziell höheren Prozentsatz, was dafür spricht, dass der Jänner nebelanfälliger als der Oktober ist. Bis jetzt wurde Nebel bei höheren Windgeschwindigkeiten betrachtet, jedoch gelten Calmen im Allgemeinen als nebelfördernd. So ist es auch am Flughafen Schwechat, denn bei 14,6% aller Meldungen mit einer Windgeschwindigkeit unter 1kt ist Nebel aufgetreten. Speziell in den Wintermonaten wurden in rund 25% aller Meldungen Nebel beobachtet. Im Schnitt zählt jede vierte Meldung bei Windstille im Winter als Nebelmeldung.

Damit werden die häufigsten Nebelfälle bei Calmen und bei variablen Windsituationen beobachtet. Aufgrund der speziellen Lage des Flughafens Wien Schwechat kann Nebel auch bei höheren Windgeschwindigkeiten auftreten.

#### 4.2.2.2 Temperatur und Taupunkt

Von besonderem Interesse für Meteorologie und Luftfahrt ist die Frage, welche Temperaturen die allgemeine Nebelbildung begünstigen.

Über diese Fragestellung soll Abbildung 4-4 Aufschluss geben. Es sind die Nebelmeldungen wieder jährlich, jahreszeitlich, sowie saisonal untergliedert worden. Wie bereits beim Wind, ist die Temperatur auch in Intervalle eingeteilt worden, wobei die Klassenbreite 3°C entspricht.

- T1: -19°C bis -21°C
- T2: -16°C bis -18°C
- T3: -13°C bis -15°C
- T4: -10°C bis -12°C
- T5: -7°C bis -9°C
- T6: -4°C bis -6°C
- T7: -1°C bis -3°C
- T8: 2°C bis 0°C
- T9: 5°C bis 3°C
- T10: 8°C bis 6°C
- T11: 11°C bis 9°C
- T12: 14°C bis 12°C
- T13: 17°C bis 15°C
- T14: 20°C bis 18°C

Dabei ist zu beachten, dass im METAR die Temperatur auf ganze Grad gerundet angegeben wird und daher bei dieser Einteilung alle Temperaturen implementiert sind. Die höchste, beziehungsweise tiefste Temperatur, bei der Nebel verzeichnet wurde, war innerhalb dieser 15 Jahre 20°C beziehungsweise -20°C. Deswegen sind die Intervalle zwischen diesen zwei Grenzen eingeführt worden.

Betrachtet man Abbildung 4-4, so sieht man für jede Jahreszeit ein entsprechendes Maximum. Vorsicht ist bei der Interpretation der Sommermonate geboten. Da hier nur wenige Fälle eingehen, sind die meisten Nebelfälle bei Temperaturen knapp unter 15°C beobachtet worden. Über 40% der Nebelmeldungen im Sommer sind in diesem Bereich verzeichnet worden, doch ist lediglich bei rund 1,16% der Meldungen mit einer Temperatur um 15°C auch tatsächlich Nebel eingetreten.

Fazit: Nebel ist im Sommer nicht sehr wahrscheinlich, tritt er dennoch auf, dann mit einer ziemlich hohen Wahrscheinlichkeit in einem Temperaturbereich von 10°C bis 20°C.

### Temperaturverteilung pro Jahreszeit bei Nebel

Summe über jede Farbe = 100%

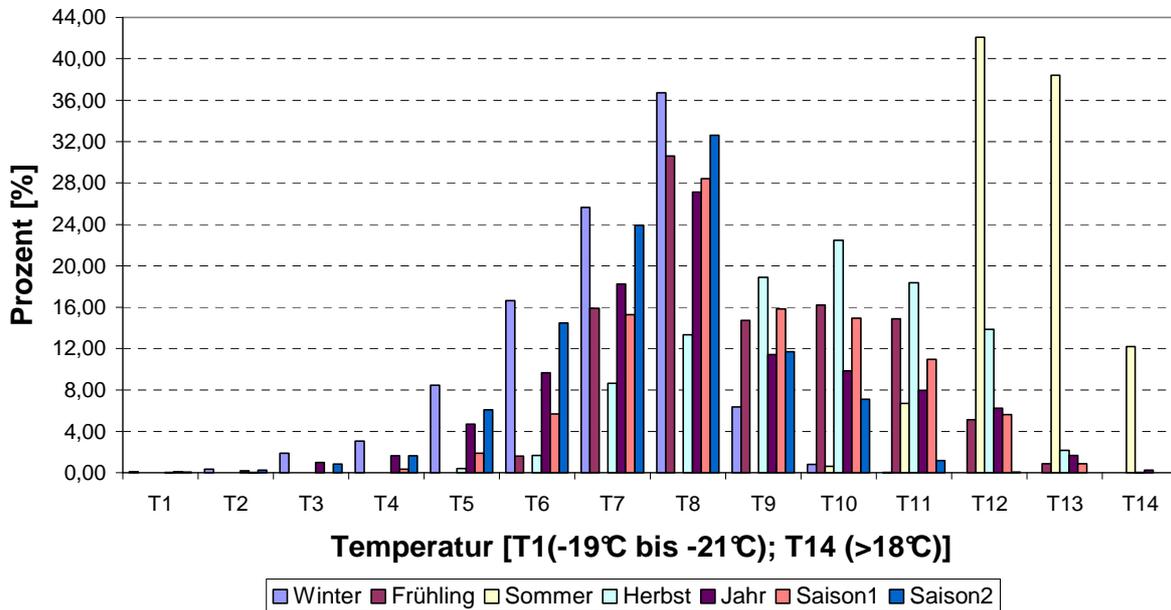


Abbildung 4-4 Verteilung der Temperatur pro Jahreszeit bei Nebel.

Generell zeigt sich, dass die vom Nebel bevorzugten Temperaturen um 0°C (Klassen T7 und T8) liegen. Dabei „hängt“ das Maximum leicht in den positiven Bereich hinein. Kältere Luft weist einen geringeren Sättigungsdampfdruck gegenüber wärmerer Luft auf. Bei negativen Temperaturen kommt es zu einem partiellen Ausfall der Feuchtigkeit in Form von Raureif. So ist etwa bei allen Temperaturen knapp um 0°C in rund 10% der Fälle auch Nebel eingetreten.

Je geringer der Spread (Temperatur – Taupunkts – Differenz) ist, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Nebel auftritt, da bei geringen Werten schneller eine Sättigung

erreicht wird. Ist jedoch ein geringer Spread die einzige Kondition für Nebelbildung?

Im Allgemeinen wird man annehmen, dass sobald sich Lufttemperatur und Taupunkt annähern, auch Sättigung eintreten muss. Dieser Gedanke, wird von

	Tdif0	Tdif1	Tdif2	Tdif3	Tdif4	Tdif5	Tdif6
Winter	57,34	39,05	3,00	0,46	0,12	0,02	0,00
Frühling	49,04	43,45	6,04	0,88	0,00	0,00	0,59
Sommer	28,05	63,41	8,54	0,00	0,00	0,00	0,00
Herbst	52,78	44,41	2,35	0,30	0,08	0,04	0,04
Jahr	54,39	41,83	3,16	0,43	0,09	0,03	0,07

**Tabelle 4.3 Temperatur-Taupunkts-Differenz** Prozentuelle Verteilung bei Nebel pro Jahreszeit. 100% ist die Summe über jede Jahreszeit. Tdif0 ist 0°C Differenz; Tdif1 ist 1°C Differenz; Tdif2 ist 2°C Differenz; Tdif3 ist 3°C Differenz; Tdif4 ist 4°C Differenz; Tdif5 ist 5°C Differenz; Tdif6 ist 6°C Differenz;

Tabelle 4.3 untermauert, wo in über 90% der Nebelfälle auch der Spread Werte von 0°C oder 1°C annimmt. Bei einer Differenz von über 2°C ist Nebel sehr unwahrscheinlich, aber nicht komplett ausgeschlossen.

Bei allen Meldungen, bei denen der Spread bei 0°C oder 1°C lag, ist zu rund 36% auch wirklich Nebel eingetreten, somit ist diese Differenz doch kein so eindeutiger Indikator mehr. Dies wird in Tabelle 4.4 veranschaulicht, in der die Prozentsätze für das Auftreten von Nebel bei einem gewissen Spread zusammengefasst sind. Den höchsten Prozentanteil trägt der

	Tdif0	Tdif1	Tdif2	Tdif3	Tdif4	Tdif5	Tdif6
<i>Winter</i>	31,27	11,63	1,27	0,25	0,08	0,02	0,00
<i>Frühling</i>	18,29	5,20	0,64	0,09	0,00	0,00	0,01
<i>Sommer</i>	6,03	2,20	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Herbst</i>	28,78	9,93	0,71	0,11	0,03	0,02	0,01
<i>Jahr</i>	27,61	8,83	0,79	0,12	0,03	0,01	0,01

**Tabelle 4.4** Prozentuelle Verteilung der Temperatur-Taupunkts-Differenz, für die Fälle in denen Nebel eingetreten ist. 100% ist jeweils die Summe, beispielsweise alle 0°C Differenzen über eine Jahreszeit. Differenzen sind ident zur Tabelle 4.3.

Winter mit 0°C Differenz. Doch selbst da ist es in 31% der Fälle tatsächlich zu Nebel gekommen. Im Sommer wurden nur in rund 6% aller 0°C Spread Meldungen auch Nebel gemeldet. Dabei ist allerdings zu sagen,

dass im METAR nur Temperatur und Taupunkt auf ganze Grad genau (siehe Abschnitt 3.1.1.) gemeldet werden. Im Extremfall könnte die Differenz zwischen Temperatur und Taupunkt 1°C sein, aber durch die Rundung nimmt man an, dass es 0°C sind. Für Fallstudien wären Aufzeichnungen auf Zehntelgrad besser geeignet, doch für eine Statistik sind ganze Grad ausreichend.

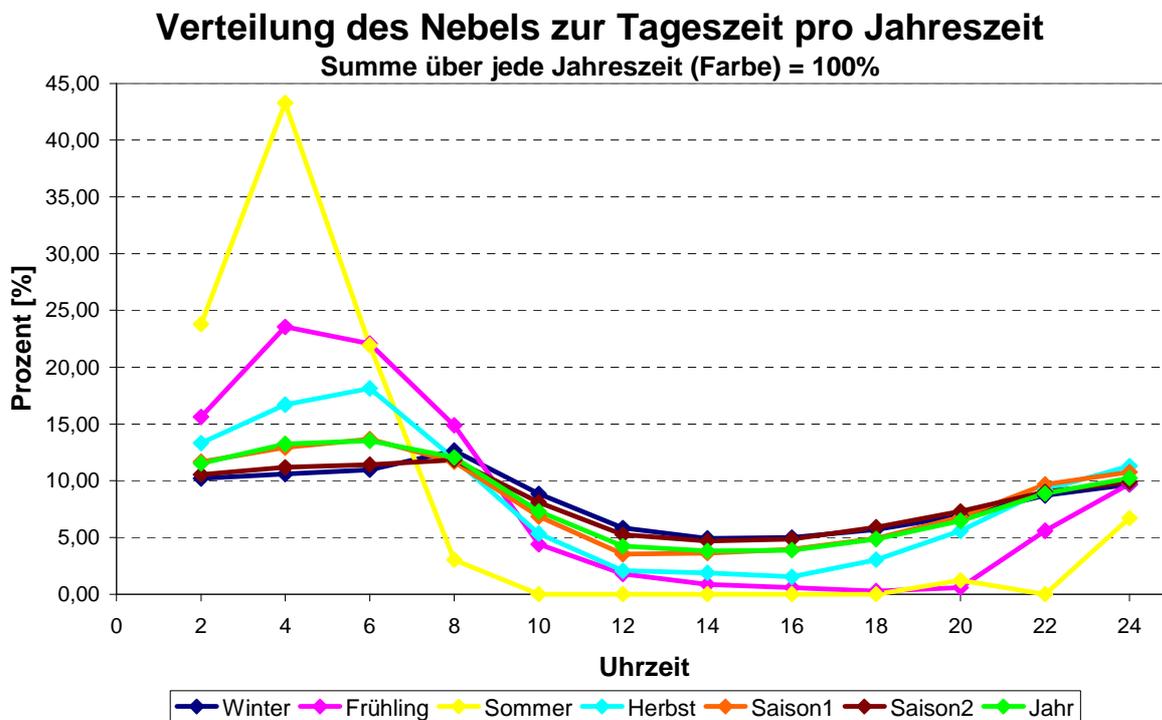
Es liegt aber nicht allein an den Daten, sondern oft bildet sich bei Sättigung Raureif oder Tau, dadurch setzt sich Feuchtigkeit aus der Luft ab und somit ist nicht mehr genügend Potential für Nebel vorhanden.

Damit ist zwar ein geringer Spread eine notwendige aber keine hinreichende Bedingung für Nebel.

### 4.2.2.3 Tageszeit

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Fragestellung, ob sich zu gewissen Uhrzeiten beziehungsweise Tageszeiten vermehrt Nebel bildet, oder auch die Auflösung begünstigt wird. Generell ist in Abbildung 4-5 die Verteilung der Nebelmeldungen auf die Uhrzeiten erforscht worden. Dabei sind wieder die einzelnen Jahreszeiten einander gegenübergestellt worden. Wie in Kapitel 3.1.1. besprochen, werden METARs um jeweils 20 und um 50 Minuten nach der vollen Stunde abgesetzt und die Uhrzeit wird in UTC angegeben. In dieser Arbeit wurden immer jeweils zwei Stunden zusammengefasst, wobei alle Meldungen

innerhalb dieser Periode der letzten Stunde zugeordnet wurden. (Beispielsweise wurden die Zeiten 00:20, 00:50, 01:20 und 01:50 in der folgenden Grafik als 2, beziehungsweise wurden als 4 alle Zeiten bezeichnet, die zwischen 2Uhr und 4Uhr Früh gemeldet wurden.) Da alle Uhrzeiten in UTC angegeben sind, gibt es keinen Sprung zwischen Sommer- und Winterzeit (Sommerzeit entspricht UTC+ 2 Stunden; Winterzeit entspricht UTC+ 1 Stunde). Summiert man die Punkte jeder einzelnen Jahreszeit auf, so kommt man auf 100%. Deshalb ergibt sich in der Abbildung auch für den *Sommer* ein Maximum bei der Klasse 4 mit über 40%. Das bedeutet, dass im *Sommer* über 40% der Nebelmeldungen in den Morgenstunden verzeichnet wurden. Um einen Vergleich zu haben, dies entspricht 71 Meldungen, während im Winter für dieselbe Uhrzeit 438 Meldungen observiert wurden. Die Einteilung der Jahreszeiten ist unter Punkt 4.2.2.1 angeführt.



**Abbildung 4-5 Die prozentuelle Verteilung der Uhrzeit pro Jahreszeit.** Die Uhrzeit ist in UTC angegeben.

Während im *Sommer* ein Tagesgang des Nebels klar erkennbar ist, mit einem Maximum in den Morgenstunden und einem Minimum über Mittag und am Nachmittag, sowie einem erneuten Anstieg in der ersten Nachthälfte, ist im *Winter*, aber auch in den *Saisonen* dieser Tagesgang nur noch angedeutet vorhanden. Dies lässt sich auf die Strahlungsenergie zurückführen, die im *Sommer* wesentlich höher ist als im *Winter*. Auch in den Übergangsjahreszeiten, *Frühling* und *Herbst*, erkennt man noch deutlich einen Tagesgang.

Damit ist auch belegt, dass Nebel in den Wintermonaten beständiger ist. Bei einer weiteren Auswertung zeigt sich, dass unabhängig von der Jahreszeit die erste Meldung einer Nebelperiode (also die „Beginnzeit“) zu rund 55% in den Zeitraum zwischen 00UTC und 08UTC fällt. Das Maximum der letzten Meldung einer Nebelperiode fällt hingegen leicht versetzt auf den Vormittag, mit über 50% auf den Zeitraum zwischen 04UTC und 12UTC. Während das absolute Minimum am Nachmittag verzeichnet wird, zeigt sich die Ausprägung eines sekundären Maximums der Nebelbildung in der ersten Nachthälfte von 20UTC bis 24UTCt.

#### 4.2.2.4 Strömungslagen

Wie auch beim Wind (bei gewissen Windrichtungen beziehungsweise Windgeschwindigkeiten treten vermehrt Nebelereignisse auf) spielen bestimmte Strömungslagen eine ähnlich entscheidende Rolle für die Nebel- und Hochnebelbildung. Dabei ist anzunehmen, dass Strömungslagen für den Hochnebel, der im nächsten Kapitel weiter erläutert wird, mehr von Bedeutung sind als für die Nebelfälle.

Es existiert eine Vielzahl an Strömungslagenklassifikationen. Dieser Arbeit liegt die Strömungsklassifikation nach Steinacker (Steinacker, 1991 [19]) zu Grunde, da diese speziell für den ostalpinen Raum (vom Bodensee bis zum Neusiedler See) erstellt wurde. Ein weiterer Vorteil im Gegensatz zu anderen Klassifikationen (zum Beispiel: Hess und Brezwosky) ist, dass sie aus nur 10 Klassen (andere Klassifikationen unterscheiden rund 30 Lagen) besteht und somit recht übersichtlich gestaltet ist.

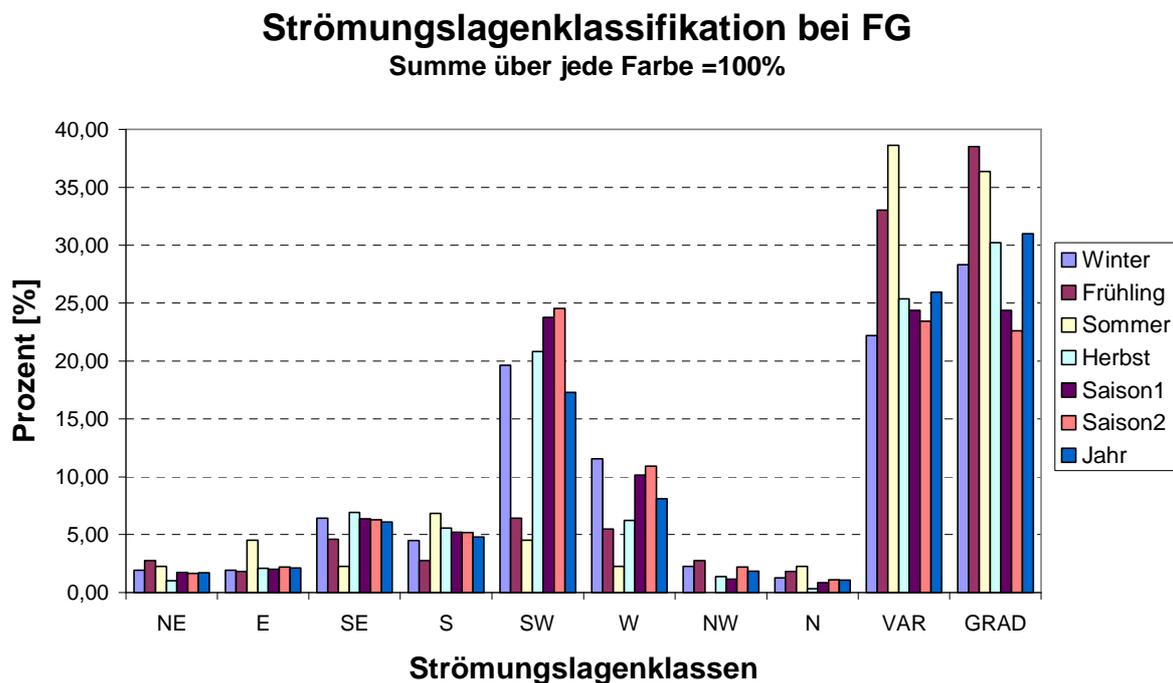
Auf Grund des schwach ausgeprägten Zusammenhanges zwischen der Druckverteilung am Boden und dem Wind in Bodennähe durch eine große ageostrophische Komponente und der oft bereits von der Bodenströmung entkoppelten 500hPa-Fläche (beziehungsweise auch der 700hPa-Fläche) wird als Grundlage für die Analyse die geglättete Strömungs- und Druckverteilung der 850hPa-Fläche der Berliner Wetterkarten herangezogen.

Auf einen Kalendertag, also pro 24 Stunden, entfällt eine Klassifikation, die aus den 00UTC Analysen der 850hPa – Fläche des Vor- und des Folgetages, sowie aus der Bodenanalyse um 12UTC gebildet wird.

Die Klassen wurden nach den vier Haupthimmelsrichtungen (Nord - N, Ost - E, Süd - S, West - W) und den vier Nebenhimmelsrichtungen (Nordost - NE, Südost - SE, Südwest - SW, Nordwest - NW) eingeteilt. Zusätzlich gibt es noch die Klassen „Gradientenschwach“ und „Variabel“. Voraussetzung für eine eindeutige Zuteilung ist, dass im Großteil des Alpenraumes den überwiegenden Teil des Tages eine einheitliche Strömung mit mehr als 15kt in 850hPa vorherrscht. Unter dieser Druckfläche überwiegt die thermische Zirkulation. Als „gradientenschwach“ werden all jene Tage definiert, an denen die meiste Zeit die

Windgeschwindigkeit unter 15kt liegt. Dabei wird die Windrichtung nicht beachtet. Während in die Klasse der „Variablen“ all jene Tage fallen, an denen keine vorherrschende Windrichtung feststellbar ist. Dies kann zum Beispiel an Tagen mit Frontdurchgang sein.

Verfügbar sind die Analysen von den Jahren 1961 bis 2003, daher sind bei der folgenden Auswertung die Jahre 1990 bis 2003 herangezogen worden. Jedem Nebeltag fiel die entsprechende Strömungslagenklassifikation zu. Dies wurde wieder saisonal (*Winter, Frühling, Sommer, Herbst, Saison1 und Saison2*) sowie jährlich ausgewertet.



**Abbildung 4-6: Prozentuelle Verteilung der Strömungslagen an Nebeltagen.** Verteilung über die Jahre 1990 bis 2003.

Bei Nebel überwiegt die Anzahl der variablen und gradientschwachen Lagen (siehe Abbildung 4-6). Aber bei einer genauen Betrachtung der Abbildung 4-12 wird deutlich, dass im Allgemeinen der Großteil aller Tage in die Kategorie der Variablen und Gradientschwachen fallen. Nach Steinacker fallen zwei von sieben Tagen in die Klasse „Variabel“ (im Schnitt etwa 104 Tage pro Jahr) und in die Klasse „Gradientschwachen“ fallen rund ein Viertel der Tage.

Sowohl im Frühling als auch im Sommer tritt das Maximum bei den gradientschwachen beziehungsweise variablen Wetterlagen auf. Der Grund dafür ist, dass zu diesen Jahreszeiten meist nur Strahlungsnebel entsteht.

Gliedert man dies nach den Strömungsrichtungen, treten bei Südwestströmungen am häufigsten Nebelfälle auf, was zu der bevorzugten Bodenwindrichtung nach Westen hin verschoben ist.

### 4.2.3 Vergleich mit der Arbeit von A. Strohmayer

Sichtreduktion ist ein wichtiges Thema in der Luftfahrt. Daher hat Adalbert Strohmayer in seiner Arbeit „*Untersuchungen über das Auftreten von Bodennebel für den Flughafen Wien*“ (1969) [20] bereits erste statistische Auswertungen über die Nebelsituation am Flughafen Wien Schwechat durchgeführt. Seine Arbeit umfasst Wettermeldungen aus den Jahren 1947 bis 1953. Dies entspricht auch dem Zeitraum, in dem Schwechat als internationaler Flughafen an Bedeutung gewinnt.

Diese Arbeit untersucht die Nebelhäufigkeit und welche Bedingungen eine Nebelbildung fördern.

Für einen ersten Überblick werden die Anzahl der mittleren Nebelstunden (Tabelle 4.5) und die Anzahl der mittleren Nebeltage (Tabelle 4.6) aus der Arbeit von Strohmayer und den Auswertungen von Abschnitt 4.2.2 vergleichend gegenübergestellt. Die Nebelstunden werden aus dem METAR berechnet, eine METAR Meldung steht für eine halbe Stunde Nebel. Um die Anzahl der mittleren Nebelstunden zu erlangen wird das arithmetische Mittel gebildet. Ein Tag wird als Nebeltag bezeichnet, wenn einmal, zwischen 0 und 24 Uhr, eine Nebelmeldung abgesetzt wurde. Hier wird ebenfalls das arithmetische Mittel verwendet.

	Winter	Frühling	Sommer	Herbst	Summe
<b>Strohmayer</b>	108	13	4	75	200
<b>1990 - 2004</b>	184	30	7	121	342

**Tabelle 4.5 Saisonale Verteilung der mittleren Nebelstunden**

In der Periode von 1990 bis 2004 gibt es sowohl eine höhere Anzahl an Nebelstunden, als auch an Nebeltagen. Der Herbst weist

im Mittel in den Jahren 1990 bis 2004 fast doppelt so viele Nebelstunden auf, als im Zeitraum von 1947 bis 1953. Im Schnitt treten in fast jedem Monat in der jüngeren Periode deutlich mehr Nebeltage auf.

	Jän.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
<b>Strohmayer</b>	6,7	3,9	2,2	0,5	0,7	0,6	0,7	0,8	1,8	5,7	5,6	8,2
<b>1990 - 2004</b>	9,5	4,8	3,6	2,1	1,7	0,9	0,7	1,5	3,4	8,9	8,5	7,9

**Tabelle 4.6 Verteilung der mittleren Nebeltage pro Monat**

Der Herbst sticht heraus, doch ist in jeder Jahreszeit die Tendenz des vermehrten Auftretens von Nebel in den Jahren 1990 bis 2004 feststellbar.

Auch Windrichtung und Windgeschwindigkeit werden untersucht, dabei kommen die Ergebnisse dieser Arbeit nahe an jene der Studie von A. Strohmayer. Das Hauptmaximum

liegt bei 150°, einen hohen Prozentsatz nehmen die Calmen ein. Hohe Windgeschwindigkeiten können ebenso nebelfördernd wirken.

Auch stellt Strohmayer in seiner Arbeit fest, dass das Maximum der Nebelhäufigkeit bei einer Temperatur von rund 0°C liegt.

Aufgrund der unterschiedlichen Klassifikationen können die Untersuchungen der Wetterlagen nicht gegenübergestellt werden. Dennoch zeigen sich ähnliche Ergebnisse bei den Höhenwinden.

### 4.3 Tiefer Stratus („Hochnebel“)

Der Hochnebel stellt ein sehr komplexes Phänomen mit nicht klar definierten Schwellwerten dar. Da im METAR für Hochnebel keine eigene Bezeichnung verwendet wird, sondern lediglich die vier Bewölkungsgruppen aufgezeichnet werden, stellt die Bestimmung des Hochnebels aus den METAR – Meldungen die erste Herausforderung dar.

#### 4.3.1 Definition des „Hochnebels“

Anhand eines Entscheidungsbaumes, welcher allerdings nicht an den Parametern fest gemacht werden darf, die später untersucht werden, soll aus den METAR – Daten die Hochnebefälle herausgefiltert werden.

Da diese Arbeit einen starken Luftfahrtbezug hat, ist eine logische Konsequenz als Kriterium, die in Kapitel 3.2.2. besprochenen LVP – Bedingungen heranzuziehen. In der Flugmeteorologie ist die Prognose von schlechten Sichten und tiefen Wolkenbasen ausschlaggebender als eine meteorologisch korrekte Definition des Hochnebels. Somit wurden all jene Meldungen, die die *Low Visibility Procedure* der Kategorie I erfüllen, also eine RVR kleiner oder gleich 1200m und/oder eine Wolkenbasis (mit einem Bedeckungsgrad von mindestens 1/8) kleiner oder gleich 300ft, ausgewählt. Viele der bereits in Abschnitt 4.2.2. behandelten Nebelfälle erfüllen genau diese Kriterien und da sie bereits analysiert wurden, war das nächste Auswahlkriterium, dass es sich nicht um Nebelfälle handeln durfte. Um sicherzustellen, dass es sich bei den vermeintlichen Hochnebefällen um keinen Frontdurchgang oder ein anderes konvektives Ereignis handelt, bei dem ebenfalls die Wolkenuntergrenze absinkt, sind weiters noch die Wettererscheinungen als Auswahlkriterium herangezogen worden. Alle Meldungen die mit einem *RA* (Regen), *SN* (Schneefall), *TS* (Gewitter), *SH* (Schauer), *GR* (Hagel), *DRSN* (seichte Schneeverwehung) und *BLSN* (Schneeverwehung) in Verbindung stehen, sind ebenfalls eliminiert worden. Lediglich die Meldungen mit *-RA* (leichter Regen), *-SN* (leichter Schneefall), *DZ* (Nieselregen), *SG* (Schneegraupel), *BR* (Dunst) und *HZ* (Dunstschleier) wurden in der Klassifikation des Hochnebels zugelassen. Diese Phänomene können durchaus in

Verbindung mit Hochnebel vorkommen. Zu beachten ist auch, dass Dunst nach einem Gewitter bewusst beibehalten wurde.

Die verbleibenden Meldungen werden im Folgenden als Hochnebefälle bezeichnet und behandelt.

### 4.3.2 Auswertung

Die Auswertung über das Auftreten von Hochnebel im Vergleich zum Auftreten von Nebel erbringt einen Überblick über die Häufigkeit dieser Ereignisse (siehe Tabelle 4.7). Dabei ist die prozentuelle Verteilung nach Monaten aufgelistet, wobei alle Meldungen die in dem Monat abgesetzt wurden, jeweils 100% ergeben. Dabei zeigt sich, dass ein Großteil der Fälle, welche die LVP1 Kriterien erfüllen, auch Nebelmeldungen sind. Beispielsweise fallen im Jänner 15,12% aller Beobachtungen in die LVP1 Kategorie, 8,36% sind Nebelfälle und 6,15% aller Meldungen erfüllen beide Bedingungen.

Rund 40% der LVP Meldungen werden gleichzeitig mit Nebel beobachtet.

	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember	Jahr
FG	8,36	3,77	1,78	0,87	0,46	0,20	0,19	0,36	1,39	6,47	5,63	6,97	3,01
LVP1	15,12	4,60	2,70	1,49	0,57	0,45	0,22	0,32	1,38	8,55	12,53	15,03	5,23
LVPoFG	7,68	1,76	1,46	0,93	0,31	0,34	0,14	0,18	0,68	4,04	7,94	8,97	2,87
LVPHN	7,31	1,45	1,07	0,60	0,21	0,30	0,13	0,13	0,64	3,76	7,55	8,45	2,63
LVP FG	6,15	1,93	0,92	0,32	0,22	0,09	0,07	0,12	0,62	3,73	3,69	4,29	1,83

**Tabelle 4.7 Prozentuelle Verteilung von Nebelfällen (FG), von Low Visibility Procedure Kategorie 1 Fällen (LVP1), von LVP1 Fällen ohne Nebel (LVPoFG), von den im 4.3.1 als Hochnebel definierten Fällen (LVPHN) und von den Fällen, die in LVP1 fallen und auch gleichzeitig Nebelfälle sind (LVPFG). 100% sind alle Meldungen pro Monat.**

Prozentuell gesehen fallen die meisten Ereignisse in die LVP1 Kategorie. Dies wird insofern klar, da es sich hier um jede Situation handelt, bei der entweder Sichtweite oder Wolkenuntergrenze oder auch beides reduziert wird. Beispielsweise kann das auch bei einer Front, aber auch beim Durchzug von Gewittern der Fall sein. Deswegen sind alle Meldungen mit Wettererscheinungen, die nicht zu Hochnebel passen, entfernt worden. Allerdings ist der Anteil der Meldungen, der aufgrund der Wettererscheinungen gestrichen wurde, relativ gering. Über das ganze Jahr gesehen sind dies rund 5% aller LVP1 Fälle. Dabei fällt auf, dass im Frühling wegen der Wettererscheinungen zwischen 15% und 22% aller LVP1 Meldungen wegfallen.

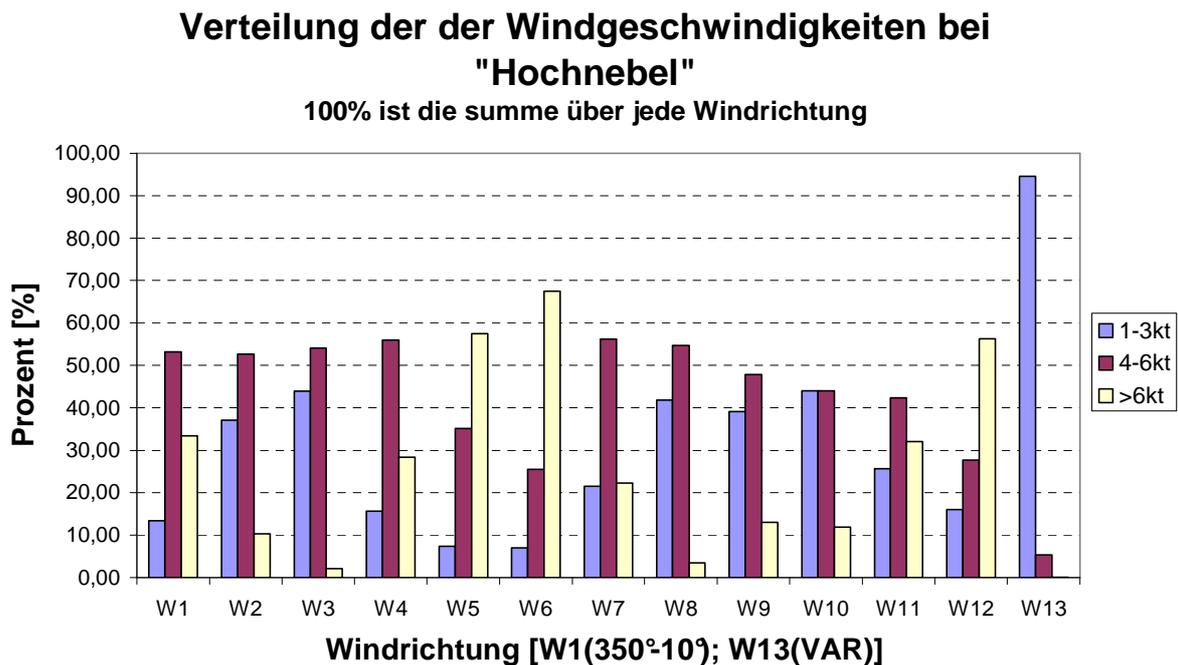
Mit diesem Entscheidungsverfahren können einfach und schnell „Hochnebefälle“ herausgefiltert werden. Außerdem tritt Hochnebel etwa so häufig wie Nebel auf. In manchen Monaten (vgl. dazu Tabelle 4.7) ist die Nebelwahrscheinlichkeit höher als die für Hochnebel.

In anderen Monaten, wie dem Dezember, ist es wieder konträr. Somit hält sich das Auftreten von Nebel und Hochnebel über das Jahr gesehen ziemlich die Waage.

### 4.3.2.1 Wind

Für die Windrichtung wurden die 14 Klassen von W1 bis W14 und für die Windgeschwindigkeit wurden die drei Unterteilungen 1kt - 3kt, 4kt - 6kt und über 6kt, aus Abschnitt 4.2.2.1 übernommen.

Abbildung 4-7 gibt die prozentuelle Verteilung der Windgeschwindigkeiten für die einzelnen Windrichtungen wieder. Dabei zeigt sich, dass im Großteil der Fälle den größten Prozentsatz die Kategorie 4kt bis 6kt einnimmt. Einzige Ausnahme bilden die südöstlichen Windrichtungen (W5 und W6), bei denen doch die starken Windgeschwindigkeiten mit über 6kt überwiegen. Bei Nordwest (W12) nehmen die starken Winde mit fast 60% eine Spitzenposition ein. Dies lässt sich wie auch schon beim Nebel auf Frontdurchgänge zurückführen.



**Abbildung 4-7 Verteilung der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit bei Hochnebel.** Windrichtung ist eingeteilt in 12 Klassen und eine Klasse „Variabel“, die Windgeschwindigkeit ist unterteilt in 3 Intervalle 1-3kt, 4-6kt und alles was über 6kt ist. 100% ist jeweils die Summe über jede Windrichtung.

Bei variablen Windrichtungen bildet beziehungsweise erhält sich Hochnebel nur bei geringen Windgeschwindigkeiten. Im Gegensatz zum Nebel spielen bei Hochnebel die höheren

Windgeschwindigkeiten eine bedeutendere Rolle. Diese sorgen am Boden für mehr Turbulenz und heben dadurch den Bodennebel. Vergleicht man Abbildung 4-2 mit Abbildung 4-7, beide stellen jeweils die Verteilung der Windgeschwindigkeit bei den unterschiedlichen Windrichtungen dar, so wird die Vorherrschaft der geringen Geschwindigkeiten bei Nebel im Gegensatz zum Hochnebel verdeutlicht.

Abbildung 4-8 zeigt die saisonale Abhängigkeit der Windrichtung für das Windgeschwindigkeitsintervall von 4kt bis 6kt. Da sich bereits in Abbildung 4-7 eine Dominanz dieses Windgeschwindigkeitsbereiches abzeichnet, wurde dieser Windgeschwindigkeitsbereich als Exempel herangezogen. Bei den Abbildungen für die beiden anderen Windgeschwindigkeitsbereiche ist ein sehr ähnlicher aber weit weniger ausgeprägter Verlauf erkennbar.

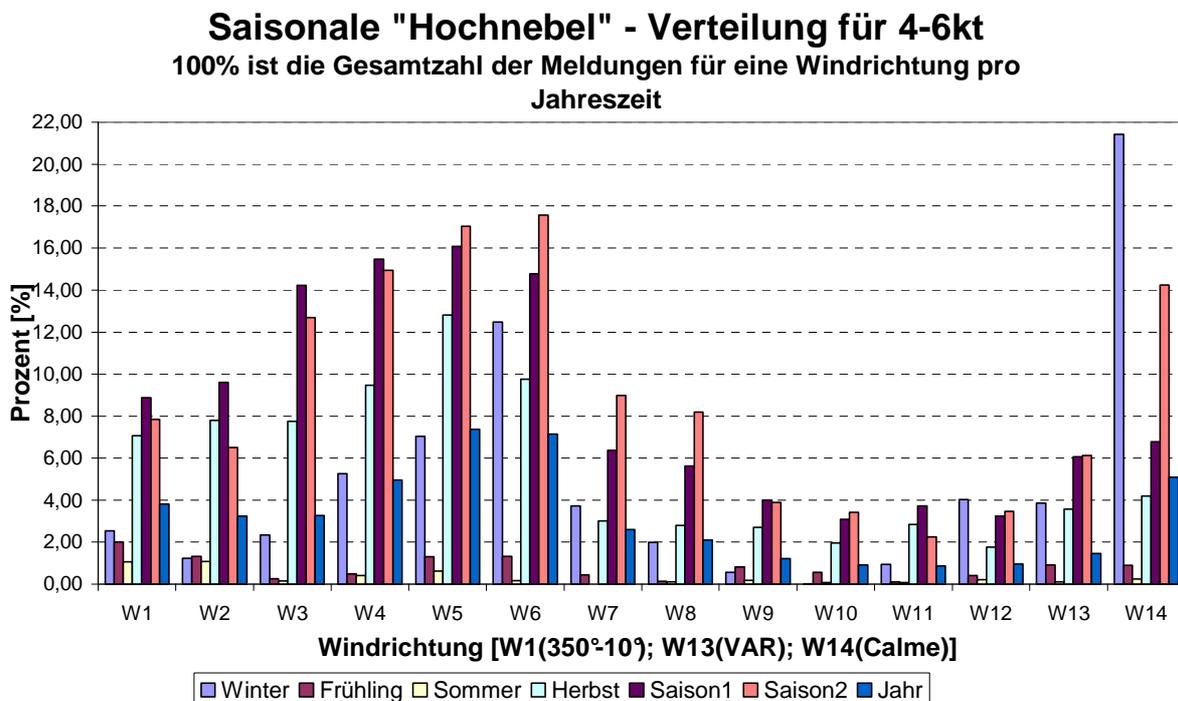


Abbildung 4-8 Prozentuelle Verteilung der Windrichtung pro Jahreszeit. 100% sind alle Meldungen einer Windrichtung und Jahreszeit.

Zu beachten ist, dass in diesem Plot (Abbildung 4-8) auch die Calmen eingebunden werden, die definitionsgemäß einer Windgeschwindigkeit von 0kt entsprechen, um eine bessere Übersicht zu erhalten. Hauptsächlich in den Wintermonaten sprechen Calmen für Hochnebel.

Da die meisten Nebelfälle in den Monaten November, Dezember und Jänner auftreten, werden die höchsten Prozentsätze in den zwei Saisonen (siehe Tabelle 4.7) erreicht.

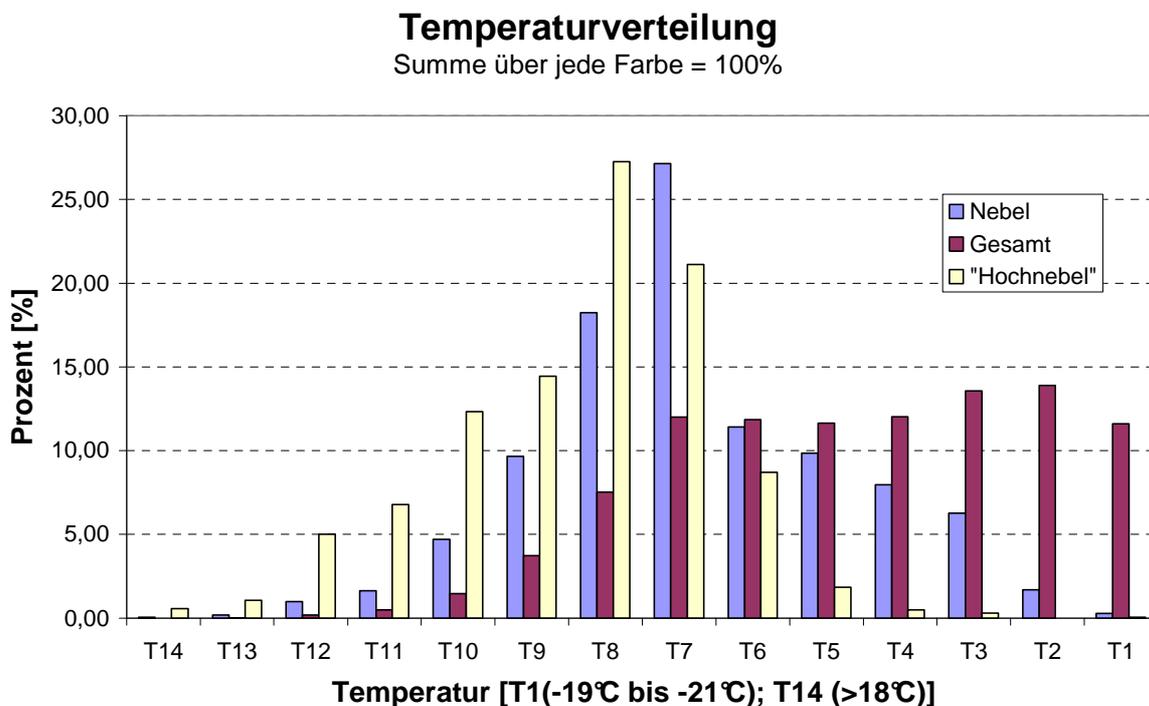
Während bei Bodennebel die südlichen Windrichtungen dominieren, verschiebt sich das Maximum bei Hochnebel zu den östlichen Winden.

### 4.3.2.2 Temperatur und Taupunkt

Für die Untersuchungen der Temperatur wurden dieselben Klassen wie bereits in Abschnitt 4.2.2.2 verwendet.

Abbildung 4-9 stellt die Temperaturverteilung bei Nebel, Hochnebel beziehungsweise die allgemeine Verteilung (bezeichnet mit „Gesamt“) der Messstelle Schwechat dar. Die Temperaturskala erstreckt sich über den Wertebereich (-19°C bis 20°C), in dem Hochnebel beziehungsweise Bodennebel observiert wurde.

Sowohl beim Bodennebel als auch beim Hochnebel ist ein sehr ähnlicher Verlauf erkennbar.

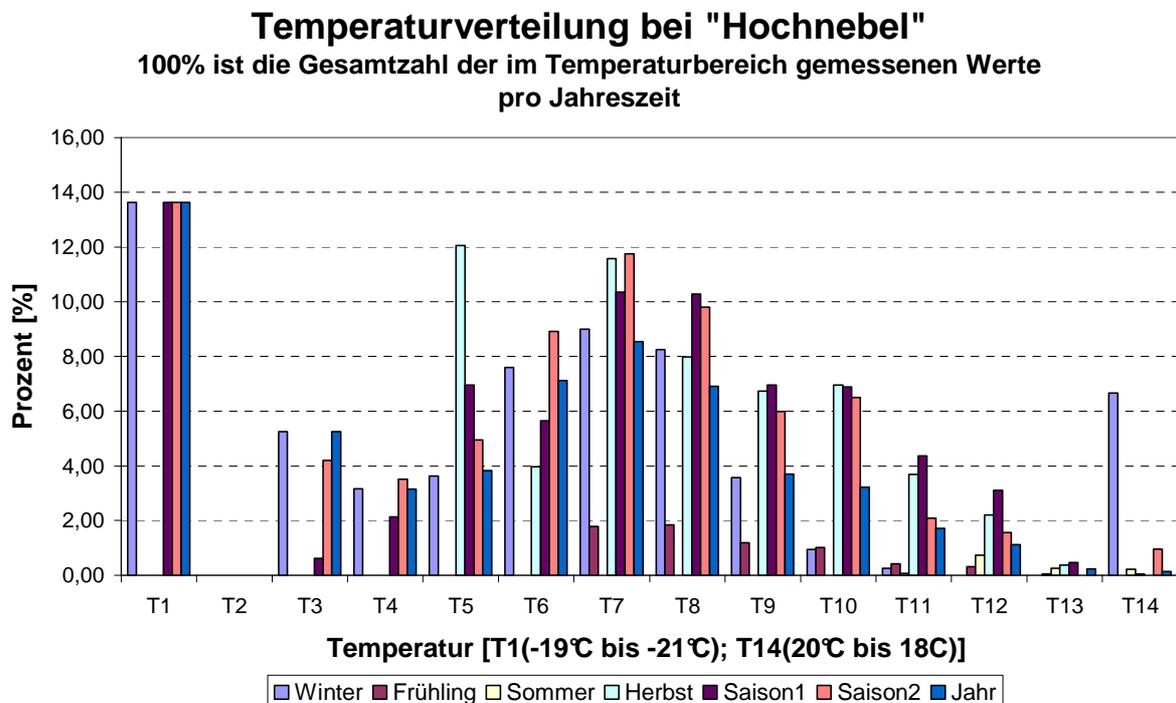


**Abbildung 4-9 Prozentuelle Temperaturverteilung** von allen Nebelfällen, Hochnebefällen und aller Temperaturwerte (Gesamt) von Schwechat. 100% ist die Summe über jede „Farbe“.

Bei beiden betrachteten Elementen lässt sich eine Glockenkurve, was auf eine Normalverteilung hinweist, erkennen. Das eindeutige Maximum liegt um 0°C im noch positiven Bereich. Auch die Prozentsätze über alle Temperaturbereiche sind in der gleichen Größenordnung. Bei der generellen Temperaturverteilung von Schwechat sind zwei angedeutete Maxima zu sehen. Das eine liegt bei 0°C und das andere bei etwa 15°C.

Obwohl extrem tiefe Temperaturen im östlichen Österreich recht selten auftreten, bildet sich in diesem Temperaturbereich verhältnismäßig häufig Nebel.

Die Verteilung der Temperatur der jeweiligen Jahreszeiten gibt Abbildung 4-10 wieder.



**Abbildung 4-10 Saisonale Temperaturverteilung bei Hochnebel**

Auffällig ist einerseits das Maximum an Hochnebeltagen im *Winter* im Bereich T1 (-19°C und -21°C). Andererseits ist ein ausgeprägtes Maximum bei T14 (20°C bis 18°C) sichtbar. In dieser 15 jährigen Periode wurde im *Winter* in 15 Fällen eine Temperatur zwischen 20°C und 18°C beobachtet. Eine dieser Meldungen entfällt auf ein Hochnebelereignis. Somit ist dieser relativ hohe Prozentsatz von 6% zu erklären, auch wenn insgesamt die Wahrscheinlichkeit der Nebelbildung in diesem Temperaturbereich gering ist.

Ähnlich verhält es sich mit dem Maximum bei T1, das scheinbar sowohl im *Winter*, als auch in den Saisonen und über das ganze *Jahr* gesehen mit fast 14% ziemlich wahrscheinlich auftritt. Da im Dezember 1996 insgesamt 22 Mal eine Temperatur in diesem Bereich gemessen wurde und auch bei drei Meldungen die Hochnebelkriterien erfüllt waren, kommt dieses Maximum zustande. Dieser Dezember fällt ebenso in die beiden Saisonen, daher wird sowohl für den *Winter*, *Saison1*, *Saison2* als auch für das gesamte *Jahr* eine Wahrscheinlichkeit, dass in diesem Temperaturbereich Hochnebel auftritt, von 14% berechnet.

Im Herbst fällt das Maximum auf T5 ( $-7^{\circ}\text{C}$  bis  $-9^{\circ}\text{C}$ ). Diese Temperatur liegt deutlich unter der mittleren Minimumtemperatur des Herbstes, die bei rund  $6^{\circ}\text{C}$  liegt (1971-2000 Quelle: ZAMG). In den drei Herbstmonaten ist ausschließlich im November Nebel in diesem Bereich beobachtet worden. Diese Temperaturen sind zwar auch für den November nicht typisch, daher ist es auch der niedrigste Temperaturbereich, in dem im November Hochnebel verzeichnet wurde, dennoch ist es verhältnismäßig oft zu Nebel gekommen. Von allen Hochnebelmeldungen in dem Bereich T5 entfallen 8% auf den November.

Im Frühling ist die Wahrscheinlichkeit für Hochnebel relativ gering und im Sommer kann man das Auftreten von Hochnebel fast völlig ausschließen.

In fast 97% der Meldungen ist die Temperatur – Taupunkts – Differenz gleich  $0^{\circ}\text{C}$  bis  $1^{\circ}\text{C}$  und somit kann ein geringer Spread als Voraussetzung für Hochnebel angenommen werden. Doch tritt Hochnebel nur in rund 30% aller Fälle, in denen der Spread in diesem Bereich liegt, auch tatsächlich auf, wobei die Nebelfälle hier auch impliziert wurden. Nimmt man nun alle Temperatur – Taupunkts – Differenzen die kleiner gleich  $1^{\circ}\text{C}$  sind, so kommt es in 70% der Fälle zu Hochnebel oder Nebel.

Somit ist der Spread eine zwingende aber noch keine ausreichende Bedingung für Hochnebelbildung.

### 4.3.2.3 Tageszeit

Kann man bei Hochnebefällen auf einen Tagesgang schließen oder ist Hochnebel unabhängig von der Tageszeit? Wann sind die bevorzugten Bedingungen für Hochnebel? Verhält es sich ähnlich wie bei Bodennebel?

In Abbildung 4-11 ist die Verteilung über die Tageszeit angegeben, dabei wurde wieder zwischen den Jahreszeiten *Winter*, *Frühling*, *Sommer* und *Herbst*, sowie den zwei Saisonen unterschieden. Auch die Verteilung über das ganze Jahr ist eingetragen. Weiters sind die Meldungen wieder in den gleichen Intervallen, wie bereits in 4.2.2.3 angeführt, eingeteilt worden. 100% erhält man, wenn man die einzelnen Werte jeder Jahreszeit zusammenzählt und daher kann man auf Grund der angeführten Prozentsätze auch nicht auf das tatsächliche Auftreten von Hochnebel zu einer gewissen Uhrzeit und Jahreszeit schließen, sondern nur Wahrscheinlichkeitsaussagen über das Auftreten von Hochnebel tätigen.

Insgesamt treten die meisten Hochnebefälle zwischen 6 und 10Uhr UTC auf. Einen klaren Tagesgang zeigen die Werte des *Sommers*, hier treten die Maxima der Häufigkeitsverteilung in der Früh und in der Nacht auf. Bei den anderen Jahreszeiten ist dies nicht so stark ausgeprägt. Tendenziell erkennt man flache Maxima. Vor allem in den Wintermonaten gibt es bei der Tageszeit kaum Unterschiede in der Häufigkeit des Auftretens von Hochnebel.

### Verteilung des "Hochnebels" über die Tageszeit 100% ist die Summe über jede Jahreszeit (Farbe)

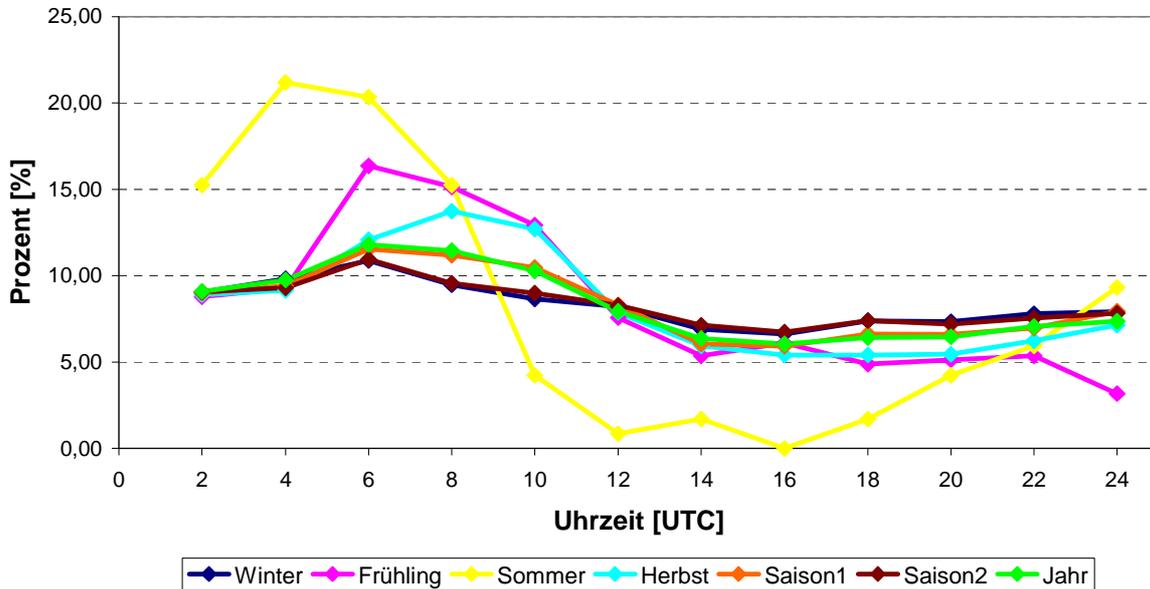


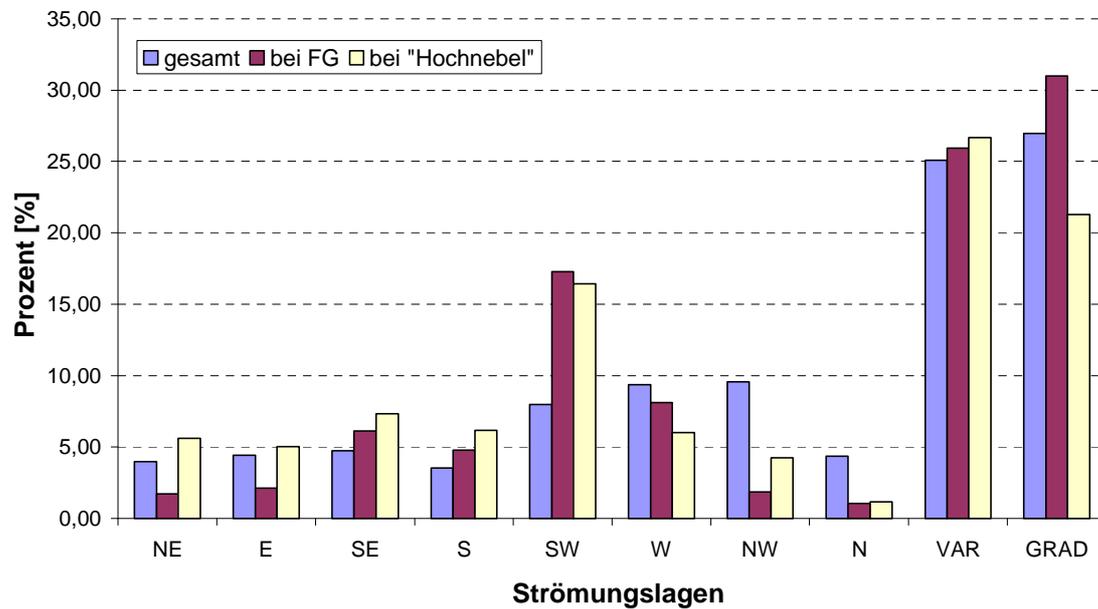
Abbildung 4-11 Saisonale Verteilung des Hochnebels im Bezug auf die Tageszeit. 100% ist die Summe über die einzelnen Jahreszeiten.

Vergleicht man diese Abbildung mit Abbildung 4-5, so erkennt man ähnliche Tendenzen, wobei der Tagesgang bei Bodennebel ausgeprägter ist. So tritt beispielsweise Nebel im Sommer zu 45% in den Morgenstunden auf, Hochnebel hingegen nur zu 20%.

#### 4.3.2.4 Strömungslagen

Für diese Auswertungen wurde wieder die Strömungslagenklassifikation nach Steinacker herangezogen (siehe Abschnitt 4.2.2.4). Abbildung 4-12 zeigt eine Auswertung der Strömungslagen, aus den Jahren 1990 bis 2003, über alle Tage, Nebel- sowie Hochnebeltage. Dabei zeigt sich, dass die Mehrzahl der Tage in die Kategorien „variabel“ und „gradientschwach“ fallen, wobei in der Verteilung die Nebeltage prozentuell häufiger an gradientschwachen Tagen auftreten, als bei den beiden anderen Kategorien. Dies lässt sich wohl auf den Strahlungsnebel zurückführen, der ruhige Wetterlagen (Wetterlagen ohne signifikante Wettererscheinungen) bevorzugt.

### Strömungslagenverteilung summe über jede Farbe =100%



**Abbildung 4-12 Prozentuelle Verteilung der Strömungslagen.** Verteilung über die Jahre 1990 bis 2003.

Gesamt: Verteilung aller Tage; FG: Verteilung aller Nebeltage; „Hochnebel“: Verteilung aller Hochnebefälle

Im Allgemeinen tritt Nebel als auch Hochnebel bei ähnlichen Anströmungsrichtungen auf. Bei beiden Erscheinungen liegt das Maximum der Auftretswahrscheinlichkeit im Bereich einer südwestlichen Strömung. Die am häufigsten auftretende Anströmung, unabhängig von Nebel und Hochnebel, ist aus Nordwest, welche verhältnismäßig selten Nebel oder Hochnebefälle induziert.

## 5 Statistische Vorhersage von Nebel

Ziel dieser Arbeit ist es ein Prognose - Tool zu entwerfen, welches den Meteorologen im operationellen Dienst bei seiner Nebelprognose unterstützend zur Seite steht. Aus der Erfahrung hat sich gezeigt, dass sich insbesondere für den Nebel statistische Verfahren eignen. Deswegen werden im ersten Teil dieses Kapitels als Einführung in die Materie statistische Vorhersagemethoden näher beschrieben. Im zweiten Teil wird die logistische Regression erläutert, welche als Auswertungsmethode herangezogen wurde.

Der Theorieteil dieses Kapitels basiert hauptsächlich auf *D.S. Wilks, **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**, 2006* [23].

### 5.1 Statistische Vorhersagemethoden

Dieser Abschnitt gibt einen Einblick in die Methoden der statistischen Wettervorhersage. Dazu werden zuerst die lineare und die multiple Regression und anschließend drei gängige Arten der statistischen Vorhersage besprochen. Das Verfahren, das im Weiteren Verwendung findet, wird im Kapitel 5.2 vorgestellt.

#### 5.1.1 Lineare und Multiple Regression

Die Grundlage vieler statistischer Vorhersagen ist die Regression, wobei die einfachste Form die lineare Regression ist. Diese stellt einen linearen Zusammenhang zwischen dem Prädiktant ( $y$ ), der abhängigen, und dem Prädiktor ( $x$ ), der unabhängigen Größe, dar. Graphisch veranschaulicht, wird in eine „Punktwolke“ (Scatter Plot) eine Gerade gelegt, welche die minimalsten Abstandsquadrate zwischen Gerade und Punkten aufweist. Daraus folgt die Regressionsgleichung:

$$\hat{y} = a + bx \quad (5.1)$$

wobei  $a$  den Abschnitt auf der  $y$ -Achsen und  $b$  den so genannten Regressionskoeffizient darstellt. Nach ein paar Rechenschritten (für die detaillierte Herleitung siehe Wilks [23] S. 181 f.) können diese auch in folgender Form, angeführt werden:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (5.2)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

In vielen Fällen wird man in die Regression mehrere Parameter (Prädiktanten) einfließen lassen und aus diesem Grund eine multiple Regression anwenden. Nach wie vor gibt es nur einen Prädiktor. Auch die Gleichung sieht jener der einfachen linearen Regressionsgleichung sehr ähnlich:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k \quad (5.3)$$

Jeder dieser Prädiktanten hat nun seinen eigenen Regressionskoeffizienten und anstelle von  $a$  wird nun  $b_0$  verwendet, welches als Regressionskonstante bezeichnet wird.

Will man eine lineare Regression verwenden, so müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Ein genügend großer Stichprobenumfang
- Datenunabhängigkeit innerhalb des Stichprobenumfangs
- Normalverteilung des Stichprobenumfangs (zumindest annähernd)

Liegt kein linearer Zusammenhang vor, so können auch andere Regressionen angewendet werden.

Bei jeder Art der Regression ist es wichtig, die „richtigen“ Prädiktanten auszuwählen. Es muss nicht gelten, dass bei der Einbeziehung mehrerer Parameter bessere Ergebnisse erzielt werden. Die Verknüpfung zu vieler Größen führt im Allgemeinen zu einem so genannten „*overfit*“, was sich negativ auf den Zusammenhang auswirken kann. Es ist wichtig, die Parameter nach der Stärke ihres Einflusses auszuwählen und mit einer geeigneten Bedingung auch den Umfang zu beschränken. Zum Schluss sollte das Ergebnis mit unabhängigen Daten geprüft werden.

### 5.1.2 Klassische Methode

Bevor numerische Modelle entwickelt wurden und der Wissenschaft zur Verfügung standen, nahm die klassische Methode ihren Anfang. Auch heute findet diese, vor allem im Bereich des *nowcasting* (in diesem Bereich erweisen sich numerische Modelle aus verschiedenen Gründen als nicht praktikabel), ihre Anwendung. Dieses Verfahren basiert meist auf einer

multiplen Regression. Aus einem historischen Datensatz wird unter Einbezug von Prädiktanten und Prädiktoren eine Regressionsgleichung berechnet. Damit ist gewährleistet, dass beim selben Input auch immer derselbe zugehörige Output geliefert wird. Mathematisch lässt sich dies in der folgenden Form darstellen:

$$\hat{y}_t = f_c(x_0) \quad (5.4)$$

Dabei steht  $t$  für einen zukünftigen Zeitpunkt. Mit dem Index 0 wird eine Beobachtung bezeichnet, die aktuell ist, beziehungsweise zeitlich vor der Prognose liegt.  $f_c$  ist die Regressionsfunktion. Das bedeutet man arbeitet auf zwei Zeitebenen.

### 5.1.3 “Perfect Prog” und MOS – Model Output Statistics

Diese zwei Verfahren haben mit der klassischen Methode gemeinsam, dass die Grundlage auch eine multiple Regression ist. Im Gegensatz zur klassischen Methode bauen „Perfect Prog“ und MOS jedoch auf einem numerischen Modell auf, wenn auch in unterschiedlicher Form.

Es gibt drei wichtige Gründe warum es sinnvoll ist einen Modell Output nochmals statistisch zu interpretieren:

- Es sind oft entscheidende Unterschiede zwischen der „realen Welt“ und der „Modell Welt“. So kann es hilfreich sein, lokale Wetterphänomene zu entdecken und so eventuelle Probleme zu beseitigen
- Numerische Modelle sind nicht in der Lage, alle Vorgänge in der Atmosphäre zu erfassen. Mit statistischen Auswertungen können systematische Fehler beseitigt werden.
- In der Natur der Atmosphäre liegt eine gewisse Unsicherheit. Mit Hilfe von statistischen Methoden kann man diese Unsicherheit einer numerischen Wetterprognose ausdrücken.

„*Perfect Prog*“ steht für *perfect prognosis* (also für perfekte Prognose). Dabei geht es nicht darum ein numerisches Modell zu verbessern, sondern aus den Ergebnissen einer numerischen Vorhersage eine „perfekte Prognose“ zu erstellen.

Die Entwicklung der Regressionsgleichung funktioniert ebenso wie die der klassischen Methode, nur mit dem Unterschied, dass bei *Perfect Prog* nur auf einer Zeitebene gearbeitet wird. Während man bei der klassischen Methode beispielsweise die heutigen Beobachtungen für die morgige Prognose heranzieht, werden bei der *Perfect Prog* -

Methode die morgigen Observationen für die morgige Vorhersage verwendet. Bei der Anwendung sind die morgigen Beobachtungen der Output des numerischen Modells.

Mathematisch lässt sich dies wie folgt beschreiben:

$$\hat{y}_0 = f_{pp}(x_0) \quad (5.5)$$

$$\hat{y}_t = f_{pp}(x_t) \quad (5.6)$$

Dabei steht (5.5) für die Entwicklung, bei der die Regression aus einem historischen Datensatz von Prädiktanten und Prädiktoren berechnet wird. Dieser historische Datensatz besteht aus Beobachtungen. In (5.6) wird nun die Anwendung angegeben, bei der die Regressionsfunktion  $f_{pp}$  aus der „Entwicklungsgleichung“ herangezogen wird. Statt der Beobachtungen werden die Vorhersagen aus dem numerischen Modell eingesetzt.

Auch beim *MOS* (Model Output Statistics) fließt, wie der Name bereits sagt, ein numerisches Modell mit ein. Hier wird im Gegensatz zur *Perfect Prog* Methode ein numerisches Modell bereits bei der Entwicklung der Regressionsgleichung verwendet. Somit benötigt man für die Berechnung zusätzlich zu den historischen Beobachtungen, die für den Prädiktor verwendet werden, noch einen Datensatz mit historischen Vorhersagen aus einem numerischen Modell, die für die Prädiktanten verwendet werden.

Bei *MOS* wird sowohl für die Entwicklung, als auch für die Anwendung, dieselbe Formel verwendet (vgl. (5.7)). Dabei ist  $f_{MOS}$  wieder die Regressionsfunktion.

$$\hat{y}_t = f_{MOS}(x_t) \quad (5.7)$$

Zu beachten ist, dass *MOS* immer nur für ein spezielles Modell, für welches die Gleichung entwickelt wurde, angewendet werden kann. Bei jeder Änderung des Modells muss auch die Regression neu berechnet werden. Dies ist aber erst möglich, wenn ein historischer Datensatz an Prognosen wieder vorhanden ist.

Jedoch liegt der große Vorteil gegenüber der *Perfect Prog* - Methode darin, dass systematische Fehler des Modells in der Gleichung berücksichtigt werden.

## 5.2 Die Logistische Regression

In der Meteorologie ist es gebräuchlich, Wahrscheinlichkeiten vorherzusagen. Man will also wissen, ob ein Ereignis eintritt, beziehungsweise mit welcher Sicherheit es eintritt. Mit dieser Fragestellung kann eine lineare Regression nur mehr sehr beschränkt angewendet werden.

Neben anderen Verfahren, wie REEP (Regression Estimation of Event Probabilities), ist die logistische Regression eine gute Alternative dazu.

### 5.2.1 Theorie

Ziel ist es, wie bei der linearen Regression einen statistischen Zusammenhang zwischen einer unabhängigen und einer abhängigen Variablen herzustellen. Der Vorteil gegenüber der linearen Regression ist, dass kein linearer Zusammenhang vorausgesetzt wird. Diese Methode eignet sich außerdem gut um dichotome Variable zu behandeln, das heißt man will nicht einen Wert bestimmen, sondern eine Aussage über das Eintreten eines Ereignisses (beispielsweise es hat sich Nebel gebildet  $\rightarrow 1$  oder es hat sich kein Nebel gebildet  $\rightarrow 0$ ) zu erhalten.

Bei herkömmlichen Regressionen können Werte unter 0 und über 1 herauskommen, allerdings schwanken Wahrscheinlichkeiten nur zwischen 0 und 1. Bei der logistischen Regression wird der Wertebereich auf dieses Intervall beschränkt.

Bei dichotomen Variablen treten auch noch andere Probleme auf, die eine Anwendung eines linearen Regressionsmodells erschweren. So sind die Varianzen der Residuen nicht konstant und die Residuen auch nicht normalverteilt, was für eine gewöhnliche lineare Regression Voraussetzung ist.

So können die Wahrscheinlichkeiten mit einer nicht linearen Gleichung ausgedrückt werden.

$$p_i = \frac{\exp(b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k)}{1 + \exp(b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k)} = \frac{1}{1 + \exp(-b_0 - b_1 x_1 - \dots - b_k x_k)}$$

oder

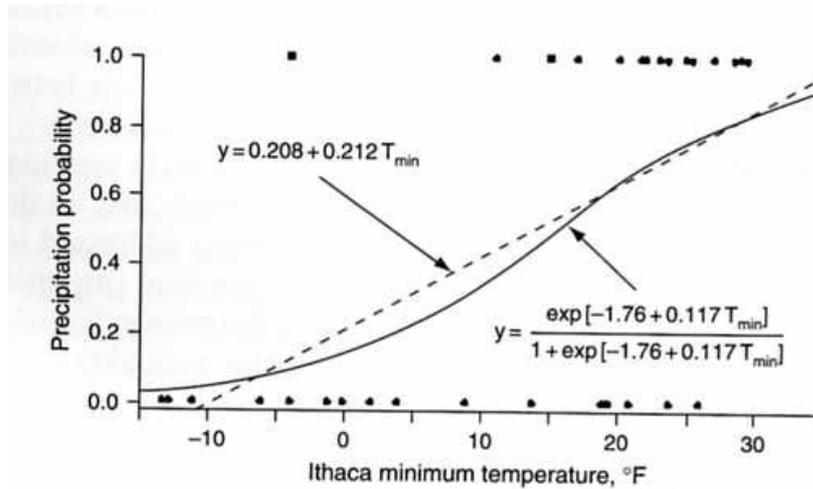
$$\ln\left(\frac{p_i}{1 - p_i}\right) = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k \quad (5.8)$$

Dabei ist  $p_i$  die prognostizierte Eintrittswahrscheinlichkeit, die von den Prädiktoren  $(x_1, x_2, \dots, x_k)$  abhängt. Geometrisch kann man die logistische Regression als S - Kurve darstellen, welche eine Funktion von  $x$  ist. Die  $b$  Koeffizienten bestimmen, ob die Kurve stark oder schwach von 0 nach 1 ansteigt.

Die zweite Schreibweise zeigt, dass mit dem Logarithmus die Gleichung auch in einer linearen Form geschrieben werden kann.  $\frac{p_i}{1 - p_i}$  wird als das *Odds - Verhältnis* bezeichnet,

welches dem Verhältnis Wahrscheinlichkeit zu Gegenwahrscheinlichkeit entspricht. Dadurch und mit dem Logarithmus kann jeder Wert zwischen  $-\infty$  und  $+\infty$  eingesetzt werden, ohne dass negative Wahrscheinlichkeiten herauskommen.

Die Regressionskoeffizienten werden über das Likelihood - Verfahren berechnet.



**Abbildung 5-1 Beispiel einer logistischen Regression (durchgezogene Linie), zeigt die S – Form der Kurve.** Dargestellt ist der Zusammenhang zwischen der Minumtemperatur und dem Niederschlag **Quelle: Wilks (2006) S. 204 [23]**

Einschub: *Maximum – Likelihood – Methode:*

Bei der Maximum – Likelihood – Methode werden unbekannte Parameter bestimmt, in dem die Likelihood – Funktion ( $\Lambda$ ) maximiert wird. Diese ist eine Funktion von unbekanntem Parametern für einen bereits bekannten Datensatz (Beobachtungen) und entspricht dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Werte. Allgemein kann man diesen Zusammenhang in folgender Form schreiben:

$$\Lambda(x_1, x_2, \dots, x_n; \vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_m) = \prod_{i=1}^n p(x_i; \vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_m) \tag{5.9}$$

$\Lambda$  muss maximiert werden, um die unbekanntem Parameter zu bestimmen. Ist die Funktion nach allen  $m$  Variablen stetig differenzierbar, setzt man alle partiellen Ableitungen gleich Null und erhält so ein Gleichungssystem.

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \vartheta_1} = 0; \frac{\partial \Lambda}{\partial \vartheta_2} = 0; \dots; \frac{\partial \Lambda}{\partial \vartheta_m} = 0 \tag{5.10}$$

Die Likelihood – Funktion nimmt an denjenigen Stellen ein Maximum an, an denen der Logarithmus  $\ln \Lambda$  maximal wird, da die Wahrscheinlichkeiten nicht negativ sind und der natürliche Logarithmus streng monoton wächst.

$$\ln \Lambda(x_1, x_2, \dots, x_n; \vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_m) = \sum_{i=1}^n \ln p(x_i; \vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_m) \quad (5.11)$$

Dies wird als Log – Likelihood – Funktion bezeichnet und ist meist gebräuchlicher.

Die entsprechende Likelihood – Funktion sieht sehr ähnlich aus, in diesem Fall sind Prädiktoren und Prädiktanten fixiert und die Wahrscheinlichkeit  $p_i$  variabel. Tritt das Ereignis ein, so ist  $\Lambda = p_i$ , sonst ist  $\Lambda = 1 - p_i = 1/(1 + \exp[b_0 + b_1 x_1 + \dots])$  bei Nicht - Eintreten des Ereignisses. Für die Regressionsparameter ist die Likelihood – Funktion das Produkt dieser einzelnen Funktionen und lautet:

$$\Lambda(b) = \prod_{i=1}^n \frac{y_i \exp(b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k) + (1 - y_i)}{1 + \exp(b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k)} \quad (5.12)$$

Die häufiger verwendete und gebräuchlichere Log – Likelihood – Funktion wird geschrieben:

$$L(b) = \ln[\Lambda(b)] = \sum \{y_i (b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k) - \ln[1 + \exp(b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k)]\} \quad (5.13)$$

Um die  $b$  Koeffizienten zu berechnen, muss diese Funktion maximiert werden.

Verwendet man die logistische Regression, so soll auch eine Angabe über die Güte der Anpassung an die vorhandenen Daten getätigt werden können. Zu diesem Zweck sind mehrere Methoden anwendbar. Eine gebräuchliche Variante ist der  $R^2$ -Koeffizient, mit dem eine Aussage über die Art und die Stärke des Zusammenhanges zwischen zwei Parametern getroffen werden kann. Jedoch gibt er keine Information darüber, welcher Parameter von welchem abhängt.

$R^2$ -Koeffizienten können für jede Art von Regressionsgleichungen berechnet werden. So wird dieser für die lineare Regression wie folgt berechnet:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (5.14)$$

wobei gilt:

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - n\bar{y}^2$$

$$SSR = \sum_{i=1}^n [\hat{y}(x_i) - \bar{y}]^2$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2$$

$$SST = SSR + SSE$$

Dabei steht *SST* für „*sum of squares total*“, was der Summe der quadratischen Abweichungen von  $y$  entspricht. Es ist ein Maß für die Variabilität des Prädiktants.

*SSR* bedeutet „*the regression sum of squares*“, die quadratische Differenz zwischen der „Regressions Vorhersage“ und dem mittleren  $y$ .

Und der dritte Wert ist *SSE*, der für „*sum of squared errors*“ steht, also die Summe der quadratischen Fehler. Bildet man diese Summe ohne Quadrate, so erhält man 0.

Für eine perfekte Regression ist nun  $SSR=SST$  und  $SSE=0$ , somit ist  $R^2=1$ .

Ist die Regression jedoch unbrauchbar, so ist  $SSR=0$  und  $SSE=SST$ , daher ist  $R^2=0$ .

Mit anderen Worten nimmt  $R^2$  immer Werte zwischen 0 und 1 an. Je näher der Wert an 1 herankommt, umso besser ist die Anpassung.

Da man mit diesem Koeffizienten gute Aussagen treffen kann, wurde versucht, diesen auf die logistische Regression abzuändern. Da kein perfektes Maß gefunden wurde, sind verschiedenen Varianten entwickelt worden, denen allen gemeinsam ist, dass sie nicht alle günstigen Eigenschaften des  $R^2$  der linearen Regression besitzen.

In dieser Arbeit wird das  $R^2_{Nagelkerke}$  verwendet, der eine Verbesserung des  $R^2_{Cox\ and\ Snell}$  (siehe (5.15)) entspricht.

$$R^2_{CoxandSnell} = 1 - \left[ \frac{\Lambda_0}{\Lambda_M} \right]^{\frac{2}{k}} \quad (5.15)$$

Dabei ist  $\Lambda_0$  gleich dem Likelihood des Nullmodells (bei dem alle Regressionskoeffizienten gleich 0 gesetzt werden, sodass nur noch die Regressionskonstanten enthalten sind) und  $\Lambda_M$  entspricht dem Likelihood des vollständigen Modells. Mit  $k$ , welches für die Anzahl der Beobachtungen steht, wird der Koeffizient gewichtet.

Der Nachteil ist, dass ein Wert nahe 1 praktisch nie erreicht wird, sondern maximal 0,75. Wird ein Wert über 0,2 erreicht, so deutet dies auf eine akzeptable Anpassung hin. Ab einen Wert von 0,4 spricht man von einer guten Modellanpassung.

Der  $R^2_{Nagelkerke}$  (siehe (5.16)) stellt eine korrigierte Form des *Cox and Snell-R<sup>2</sup>* dar, dadurch werden auch Werte über 0,75 erreicht.

$$R^2_{Nagelkerke} = \frac{R^2_{CoxandSnell}}{1 - (\Lambda_0)^{\frac{2}{k}}} \quad (5.16)$$

Über die Anpassung des Modells können auch Aussagen über die *Devianz* getroffen werden. Diese ist lediglich  $-2L(b)$ . Umso kleiner die *Devianz*, das heißt, je näher sie an null heran kommt, desto besser ist die Anpassung.

### 5.2.2 Auswertung der Daten mit einer Logistischen Regression

Um nun einen Zusammenhang zwischen den meteorologischen Parametern und dem Auftreten von Nebel zu untersuchen, wurden mit Hilfe der Logistischen Regression die METAR Daten von 1990 bis 2004, die bereits in 4.1 beschrieben wurden, ausgewertet.

Die Berechnungen wurden zuerst mit MATLAB (The Maths Works, Inc) durchgeführt und anschließend mit dem Open – Source Statistikpaket „R“ überprüft. Für die logistische Regression werden in „R“ über das Paket „Design“ alle für die Berechnung notwendigen Befehle zur Verfügung gestellt.

Zuerst wurden Regressionen für einzelne Parameter, anschließend für Kombinationen aus zwei bis sechs Einflussgrößen berechnet. Zu jeder Regressionsgleichung wurde eine entsprechende Graphik erstellt, die im Folgenden angeführt werden. Den meisten Abbildungen, vor allem bei der Darstellung von ein, zwei oder drei Elementen, ist gemeinsam, dass im linken oberen Bereich (bezeichnet mit a) eine relative Häufigkeitsverteilung aller Messwerte über die 15 Jahre, unabhängig davon, ob Nebel aufgetreten ist oder nicht, für diese meteorologische Größe dargestellt wird. Auf der rechten Seite des oberen Bereichs (bezeichnet mit b) ist eine Verteilung der relativen Häufigkeiten der Messwerte bei Nebel abgebildet. Beiden Darstellungen ist gemeinsam, dass jeweils die Summe über alle Balken 1 ergibt, was 100% entspricht. Links unten (bezeichnet mit c) ist die aus der logistischen Regression berechneten Wahrscheinlichkeit als Linie und die Häufigkeiten aus den Beobachtungen als Punkte eingetragen. Je näher die Punkte an der Geraden liegen, desto besser ist die Anpassung der Regressionsgleichung. In dieser Graphik ist auch die Gleichung der Regression und der Log Likelihood – Wert angeführt. Die vierte Darstellung (bezeichnet mit d) ist die aus der logistischen Regression berechneten Wahrscheinlichkeiten gegen die beobachteten Nebelhäufigkeiten aufgetragen, wobei hier ein Indiz für eine gute Anpassung wäre, wenn die aufgetragenen Punkte nahe der Diagonalen

(der 45° - Geraden) lägen. Da diese ersten drei Illustrationen bei mehreren Einflussgrößen rasch unübersichtlich werden, ist in diesen Fällen nur die letzte Graphik mit der Regressionsgleichung angeführt.

Auch hier wurde, wie bereits in Kapitel 4, wieder zwischen Nebel und Hochnebel unterschieden.

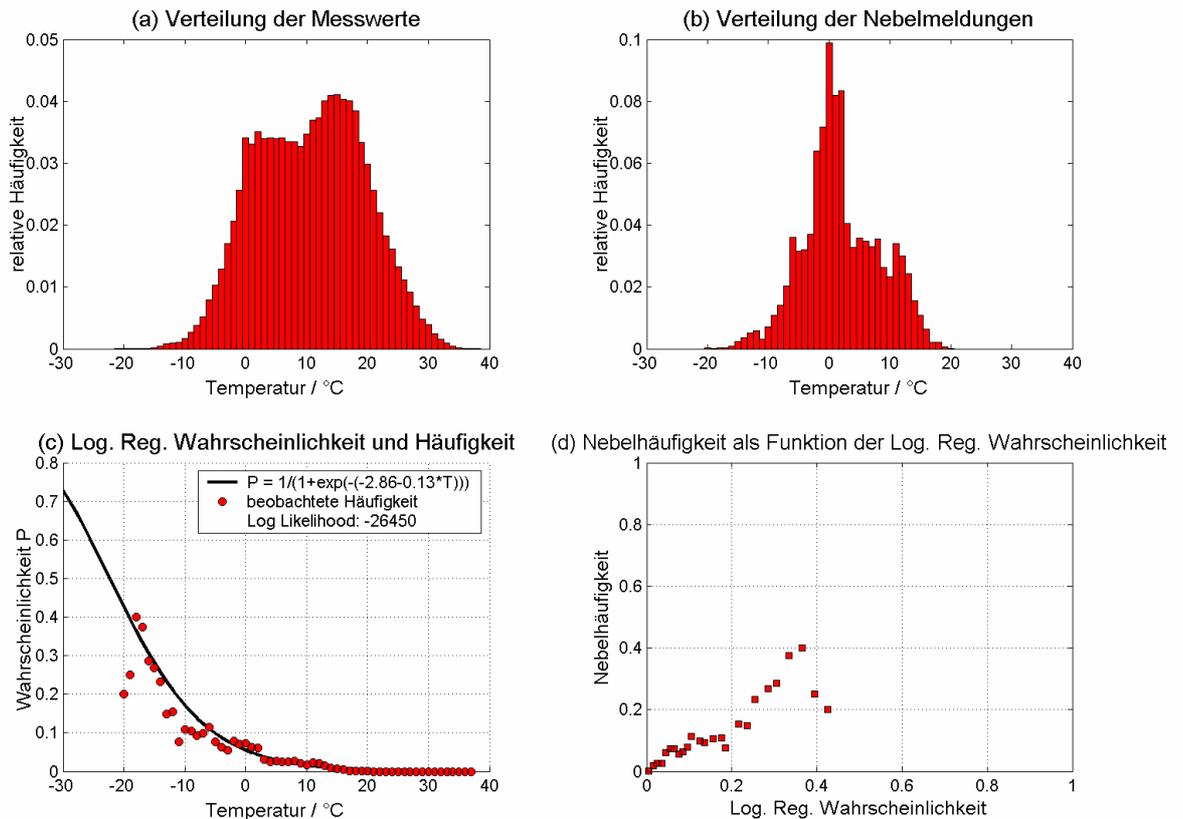
### 5.2.2.1 Nebel

Es wurden die Parameter Temperatur, Taupunkt, Spread, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Bedeckung, Luftdruck, Jahresverlauf und Tagesverlauf untersucht.

- ***Temperatur, Taupunkt und Spread***

Temperatur und Taupunkt zeigen einen sehr ähnlichen Zusammenhang zwischen Auftreten und Nicht - Auftreten von Nebel. Deswegen wird hier im Weiteren nur auf die Temperatur eingegangen, welche in Abbildung 5-2 ersichtlich ist. Bei der Darstellung der relativen Häufigkeiten erkennt man zwei Peaks, einen steileren bei rund 15°C und einen flacheren bei rund 0°C. Im Vergleich dazu tritt bei Nebel ein deutliches Maximum im Bereich von 0°C auf. Diese Verteilungen wurden bereits in Kapitel 4.2.2.2 näher besprochen.

In der Graphik der Regressionskurve (Abbildung 5-2(c)) liegen die Punkte der beobachteten Häufigkeiten nahe dieser Kurve, was auf eine gut angepasste Gleichung schließen lässt. Zum Vergleich dazu ist in Abbildung 5-2 (d) die beobachtete Nebelhäufigkeit gegen die berechneten Wahrscheinlichkeiten aufgetragen. Auch dies lässt den Schluss einer guten Anpassung zu, da die Punkte annähernd, mit nur wenigen Ausnahmen, entlang der Diagonale liegen. Mit dem  $R^2$  Wert von 0,129 befindet sich dieser zwar in einem niedrigen, aber akzeptablen Bereich, auch wenn dies gleichzeitig bedeutet, dass die Temperatur als einzige Größe nicht ausreichend für eine Nebelprognose ist. Temperatur und Taupunkt haben zwar einen ähnlichen Zusammenhang, jedoch ist der Taupunkt mit einem  $R^2$  von 0,038 statistisch weniger aussagekräftig.



**Abbildung 5-2** Auswertungen der Temperatur für Nebel aus den Jahren 1990 bis 2004.

Kombiniert man jedoch Temperatur und Taupunkt über den Spread, so erhöht sich der Wert des  $R^2_{\text{Nagelkerke}}$  auf 0,401, was auf eine gute Abstimmung schließen lässt. Die Graphiken für den Spread sind in Abbildung 5-3 dargestellt.

Dass eine geringe Temperatur - Taupunkts - Differenz als Voraussetzung angenommen werden kann, wird aus dieser Graphik deutlich, da in rund 90% aller Nebelfälle der Spread bei 0°C oder 1°C liegt. Dabei ist zu beachten, dass ein Spread von 1°C in 14% aller Messungen auftritt (was vergleichsweise häufig ist) und nicht unbedingt mit Nebel einhergehen muss.

An der Lage der beobachteten Häufigkeiten zu der Regressionskurve in der Abbildung 5-3 (c), aber auch an Hand der Funktion der beobachteten Häufigkeiten aus den berechneten Wahrscheinlichkeiten (Abbildung 5-3 (d)) zeigt sich gerade eine sehr gute Anpassung.

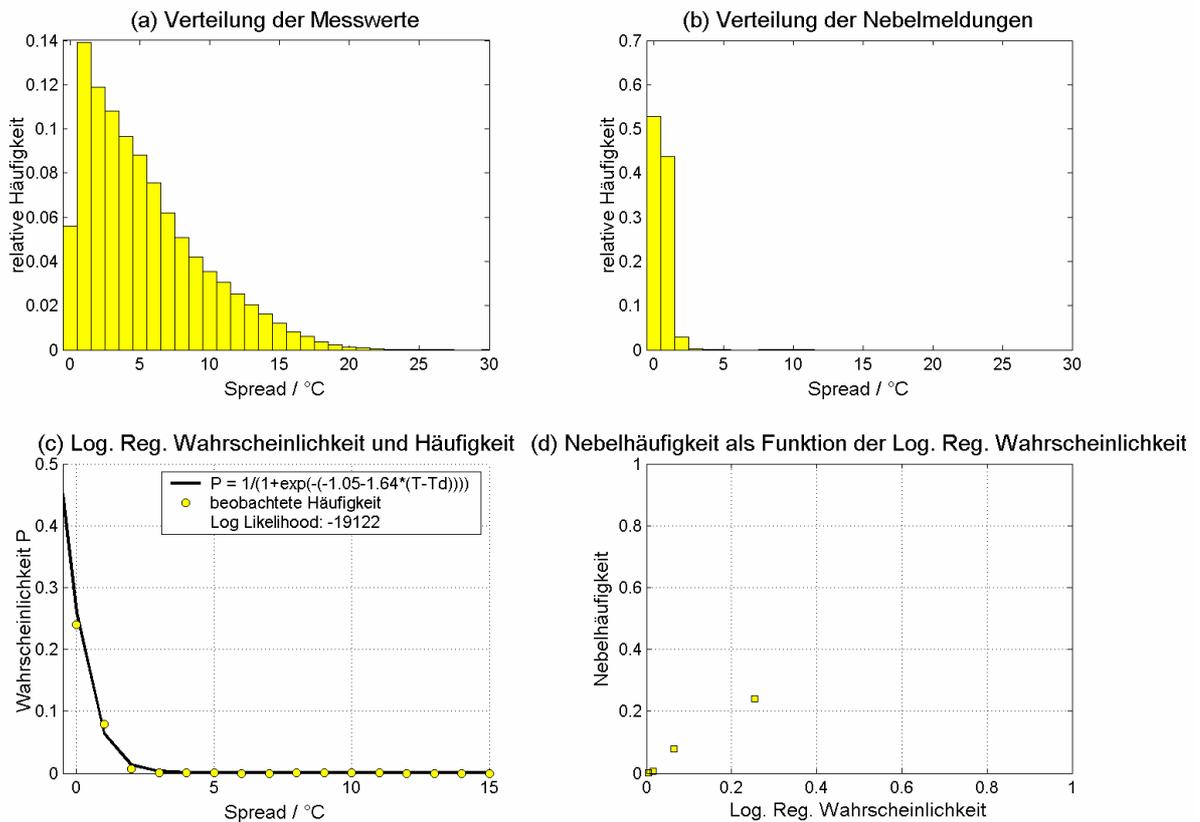


Abbildung 5-3 Auswertungen des Spreads für Nebel aus den Jahren 1990 bis 2004

- **Windgeschwindigkeit und Windrichtung**

In Abbildung 5-4 ist die Auswertung der Windgeschwindigkeit dargestellt. Bei der Verteilung der relativen Häufigkeiten sieht man, dass hauptsächlich mittlere Windgeschwindigkeiten, im Bereich von 3kt bis 10kt, auftreten. Aus der Graphik der Häufigkeitsverteilung bei Nebel ist ersichtlich, dass Nebel meist bei einer Windgeschwindigkeit von 2kt bis 5kt gemeldet wird. Aber auch bei höheren Windgeschwindigkeiten, hauptsächlich im Bereich von 10kt bis 20kt und vereinzelt auch über 20kt, wird noch Nebel beobachtet.

Abbildung 5-4(c) lässt den Schluss zu, dass die Berechnung der Regression gut mit den Beobachtungen übereinstimmt. Auch die aus den berechneten Wahrscheinlichkeiten und den beobachteten Nebelhäufigkeiten resultierenden Werte liegen nahe der 45° - Geraden (vgl. Abbildung 5-4 (d)), somit ergibt sich ein sehr stimmiges Bild.

Der  $R^2$  Wert für die Windgeschwindigkeit beträgt 0,118 und liegt so in einem ähnlichen Bereich wie bei der Temperatur.

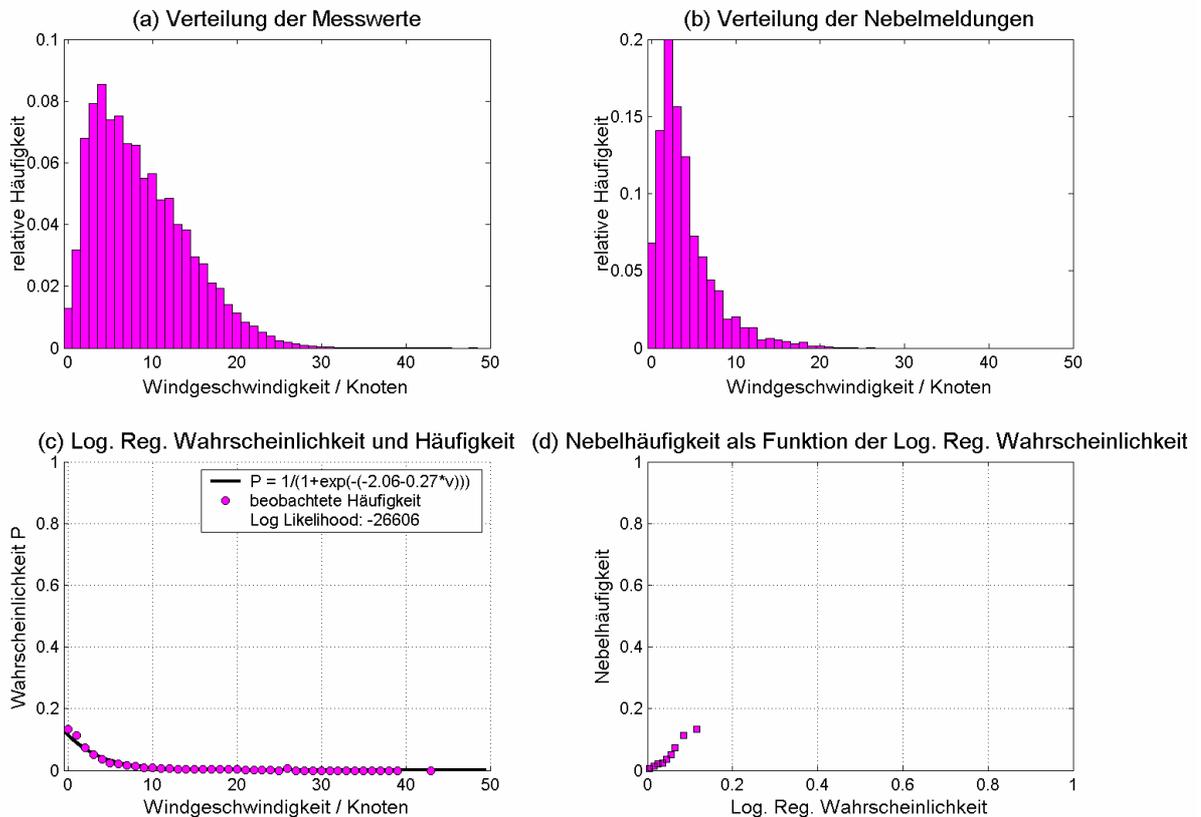


Abbildung 5-4 Auswertung der Windgeschwindigkeit für Nebel aus den Jahren 1990 bis 2004

Das Maximum dieser Größe kristallisiert sich bei Südost (zwischen 140° und 160°) und bei Nordwest (zwischen 300° und 350°) heraus. Aufgrund dieser „sinusförmigen“ Verteilung der Windrichtung ist die Auswertung nicht ganz so unproblematisch durchzuführen, wie bei den anderen Elementen. Unter Verwendung der Sinusfunktion  $dd_{lin} = \sin(2 \cdot \pi \cdot dd \cdot 1,033/360 - 0,495)$  wurde die Windrichtung umgerechnet um eine bessere Anpassung mit der logistischen Regression zu erzielen. Dieser Vorgang wird im folgendem als Linearisierung bezeichnet, daher steht  $dd_{lin}$  für die linearisierte,  $dd$  für die ursprüngliche (10° bis 360°) Windrichtung. Dadurch ergibt sich zwar die Problematik, dass aus den Grafiken die genaue Windrichtung nicht mehr eindeutig ablesbar ist, aber man erhält bei der Berechnung der Regressionsgleichung ein deutlich besseres Ergebnis, was wesentlich entscheidender ist. In Abbildung 5-5 sind die Auswertungen für die linearisierten Windrichtungen zu sehen.

Die Windrichtung beeinflusst die Nebelbildung durchaus stark, wie in Kapitel 4.2.2.1 bereits gezeigt wurde, allerdings lässt sich mit der logistischen Regression keine optimale Anpassung erzielen. Dennoch ist die in Abbildung 5-5 gezeigt Regressionsgerade durchaus

brauchbar. Auch der  $R^2$  Werte von 0,066 belegt, dass die Anpassung deutlich schlechter ist als vergleichsweise bei der Temperatur oder der Windgeschwindigkeit.

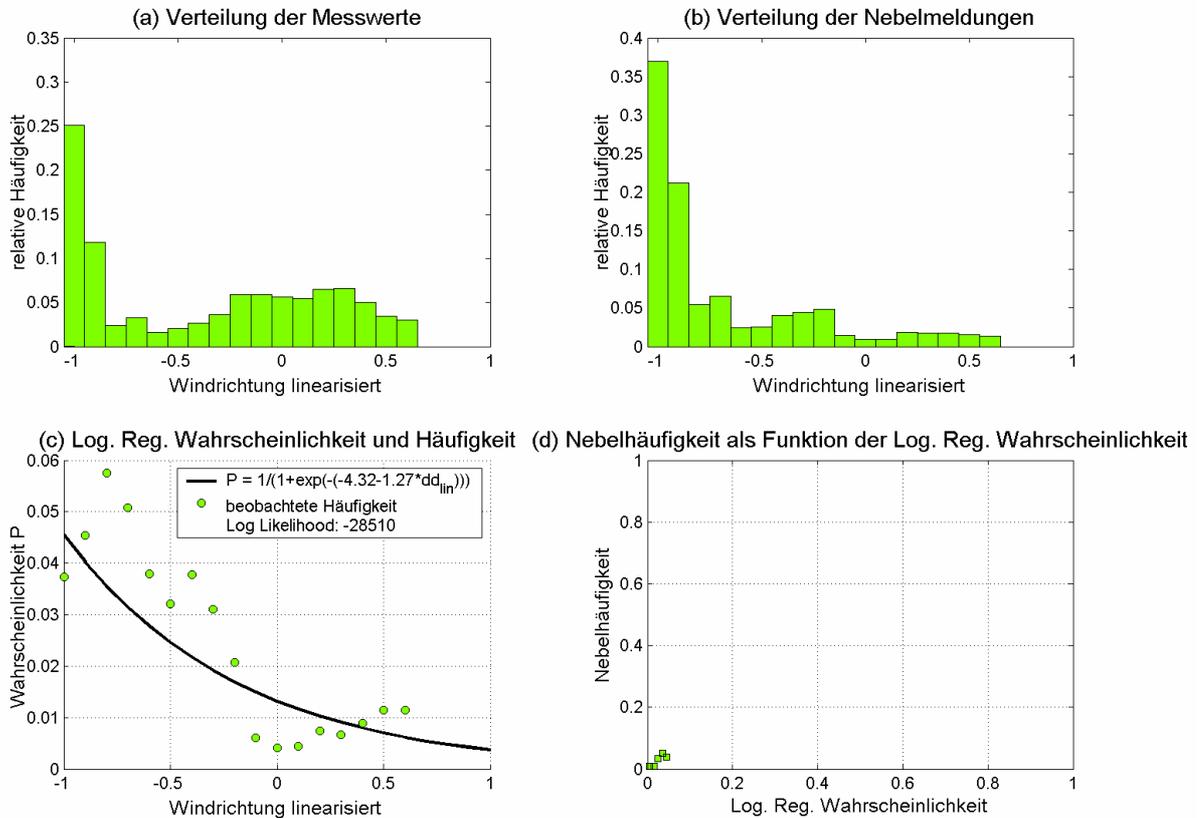


Abbildung 5-5 Auswertung der linearisierten Windrichtung für Nebel von den Jahren 1990 bis 2004

• **Bedeckungsgrad**

Auch bei der Bedeckung kann mit einer Art „Linearisierung“ eine bessere Anpassung erzeugt werden. Die Bedeckung ist angegeben in SKC (0/8), FEW (1/8 bis 2/8), SCT (3/8 bis 4/8), BKN (5/8 bis 7/8) und OVC (8/8), wobei diese nicht zwingend in dieser Reihenfolge aufgelistet werden müssen. So sind die Bedeckungsgrade nach ihrer Häufigkeit umsortiert worden, wie aus Abbildung 5-6 ersichtlich ist.

Am häufigsten wird ein Bedeckungsgrad von SCT, gefolgt von FEW gemeldet. Diese zwei Kategorien ergeben mit fast 90% aller Meldungen die absolute Mehrheit. Diese beiden Bedeckungsgrade bilden im Fall von Nebel ebenfalls die Mehrheit, allerdings nur noch mit 60%. Auffällig ist, dass der Bedeckungsgrad SKC (wolkenlos) bei Nebel am seltensten gemeldet wurde.

Die Regressionsgerade zeigt eine sehr gute Anpassung, da die Punkte nahe an der Geraden liegen (vgl. Abbildung 5-6(c)). Der  $R^2$  Werte liegt um 0,1, was für eine nicht ganz optimale, dennoch brauchbare Anpassung spricht.

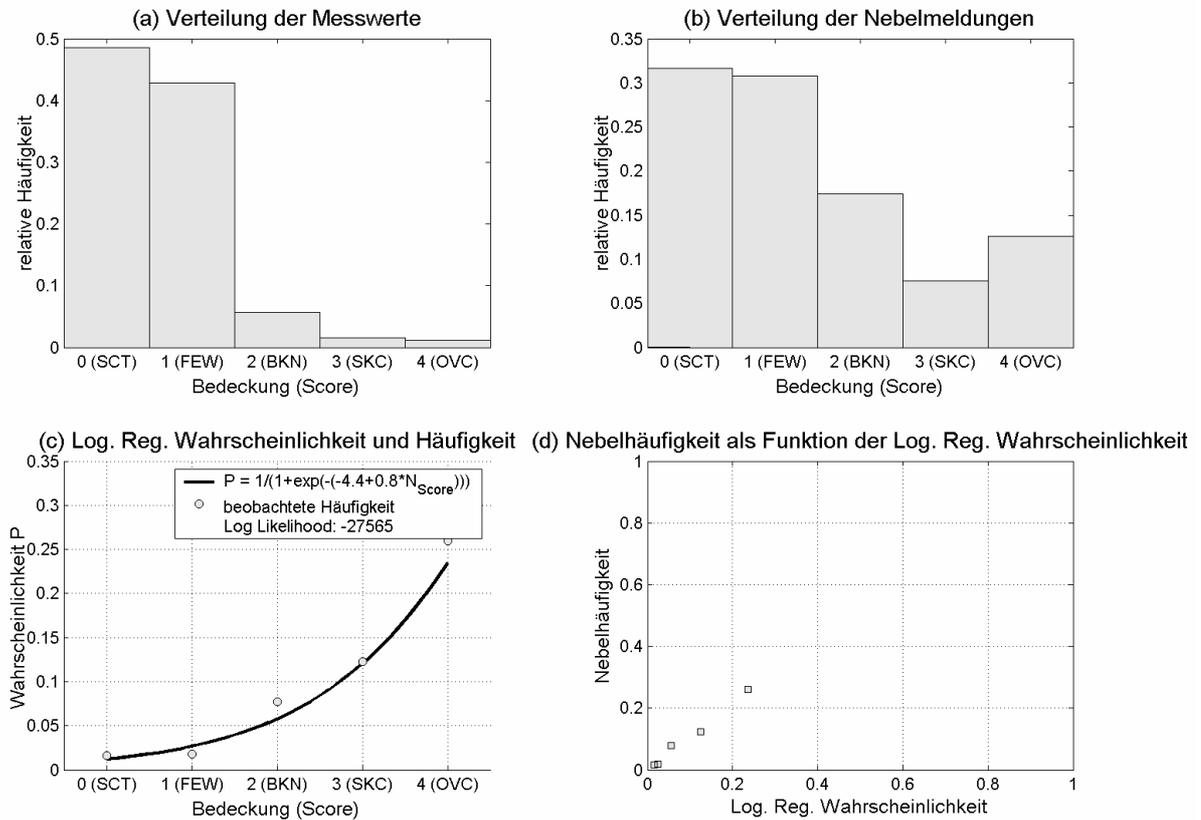


Abbildung 5-6 Auswertung der Bedeckung für Nebel aus den Jahren 1990 bis 2004

Aus der Nebelhäufigkeit als Funktion der aus der logistischen Regression berechneten Wahrscheinlichkeit (vgl. Abbildung 5-6(d)) kann jedoch auch auf eine gute Abstimmung geschlossen werden, da die resultierenden Werte nahe der 45° - Geraden liegt.

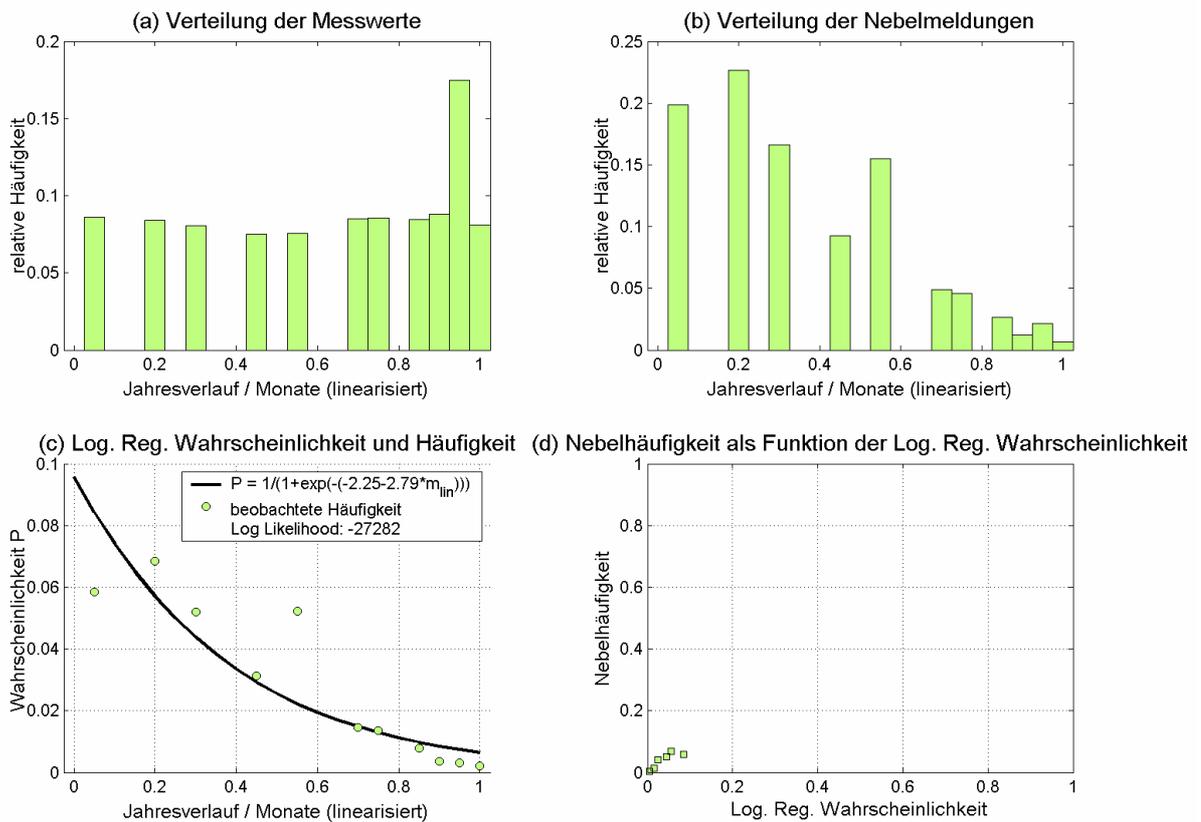
• **Jahresverlauf und Tagesverlauf**

Bereits in Kapitel 4 wird festgehalten, dass gewisse Monate, auch gewisse Uhrzeiten, eine Nebelbildung begünstigen, daher werden diese zwei Parameter mit der logistischen Regression ausgewertet. Jedoch ergibt die Auswertung in einer nicht linearisierten Form weder für die Jahreszeiten noch für die Tageszeiten eine gute Anpassung. Durch den sinusförmigen Verlauf der Meldungen bei Nebel (sowohl für Monate, als auch für Uhrzeiten) können die Ergebnisse mit einer Sinus – Linearisierung verbessert werden. Für die Jahreszeiten wird die Funktion  $\sin(2*\pi*Monat/24 -0.035)$  und für die Uhrzeiten

$\sin(2 \cdot \pi \cdot \text{Stunde} / 24 + 0.905)$  verwendet. Wobei die Monate mit den Werten 1 bis 12 und die Uhrzeiten mit 0 bis 23 eingegeben werden.

Wie auch bei der Windrichtung lassen sich dadurch aus den Graphiken die nebelbevorzugten Monate und Uhrzeiten nicht eindeutig herauslesen.

In Abbildung 5-7 sind die Ergebnisse des linearisierten Jahresverlaufes, also der Monate, zusammengefasst.



**Abbildung 5-7 Auswertungen des Jahresverlauf (der einzelnen Monate) für Nebel der Jahre 1990 bis 2004.**

Mit der Linearisierung liegen die Punktwerte der beobachteten Häufigkeiten nahe der Regressionskurve (vgl. Abbildung 5-7(c)), dies lässt einen Rückschluss auf eine Anpassung zu. Der entsprechende  $R^2_{\text{Nagelkerke}}$  Wert ist 0,127 und spricht somit auch für eine akzeptable Anpassung. Die berechnete Wahrscheinlichkeit, welche gegen die beobachtete Nebelhäufigkeit aufgetragen wurde (Abbildung 5-7( d)), zeigt, dass die Übereinstimmung gut ist. Allerdings bewegen sich die Wahrscheinlichkeiten in einem geringen Bereich.

In Abbildung 5-8 sind die Auswertungen zu der Uhrzeit beziehungsweise Tageszeit zu sehen. Die beobachteten Häufigkeiten liegen meist nahe an der Regressionskurve (Abbildung 5-8 (c)), was für eine nicht so schlechte Anpassung zwischen Beobachtungen und Berechnungen spricht, allerdings nur in einem niedrigen Wahrscheinlichkeitsbereich. Das  $R^2$ , mit welchem man eine Aussage über die Güte der Regression machen kann, liegt allerdings bei lediglich 0,028 und ist somit der niedrigste von allen untersuchten Parametern. Der Grund dafür liegt darin, dass das Regressionsmodell nicht gut zwischen Auftreten und Nicht - Auftreten unterscheiden kann.

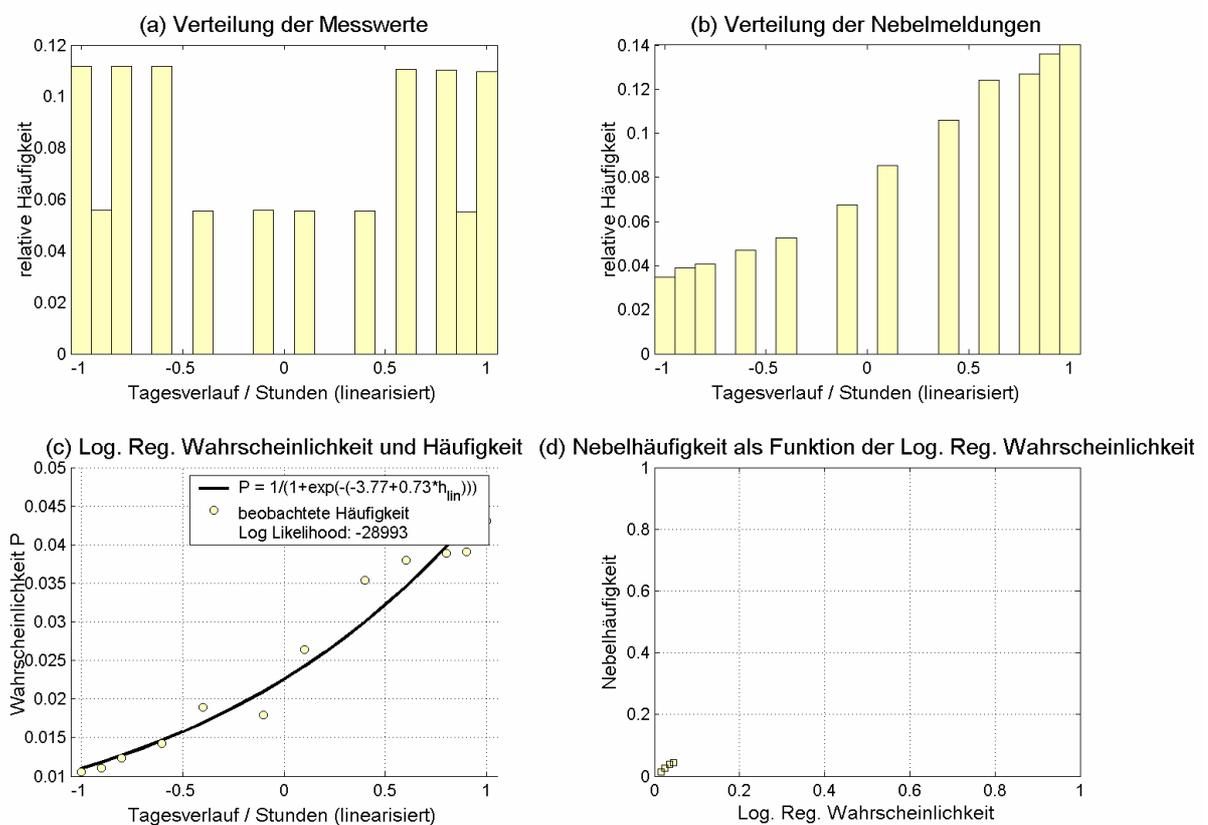


Abbildung 5-8 Auswertung der Tageszeit für Nebel von den Jahren 1990 bis 2004.

Plottet man die beobachtete Nebelhäufigkeit gegen die berechnete Wahrscheinlichkeit aus der Regression (Abbildung 5-8 (d)), ergeben sich Werte nahe der 45° - Geraden, jedoch auch wiederum in einem sehr niedrigen Wahrscheinlichkeitsbereich.

- ***Kombinierte Regressionsgleichungen***

Nebel ist eine Wettererscheinung, die von vielen Faktoren beeinflusst wird. Deshalb ist es wichtig, mit einer multiplen Regression zu arbeiten. So können verschiedene Parameter gut einbezogen werden und die Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Nebel verbessert werden.

Zuerst werden Regressionen mit zwei verschiedenen, später mit drei verschiedenen Parametern berechnet. Zum Schluss wird mit den „besten“ fünf Einflussgrößen eine Regressionsgleichung aufgestellt.

Mit der Kombination folgender Größen werden gute Ergebnisse erzielt:

- Windgeschwindigkeit mit Bedeckung (Abbildung 5-9)
- Spread und Bedeckung (Abbildung 5-10)
- Spread und Windgeschwindigkeit (Abbildung 5-11)
- Bedeckung, Spread und Windgeschwindigkeit (Abbildung 5-12)
- Spread, Temperatur, Bedeckung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung (Abbildung 5-13)

In der ersten Graphik werden die Windgeschwindigkeit und die Bedeckung miteinander gekoppelt. Die Bedeckung wird wieder in der „linearisierten“ Form verwendet, wie sie bereits bei der einzelnen Auswertung der Bedeckung beschrieben und angewendet wurde.

Auf Grund der zwei verschiedenen Parameter, werden die Häufigkeitsverteilungen wie auch die „Regressionskurve“ als Fläche dargestellt.

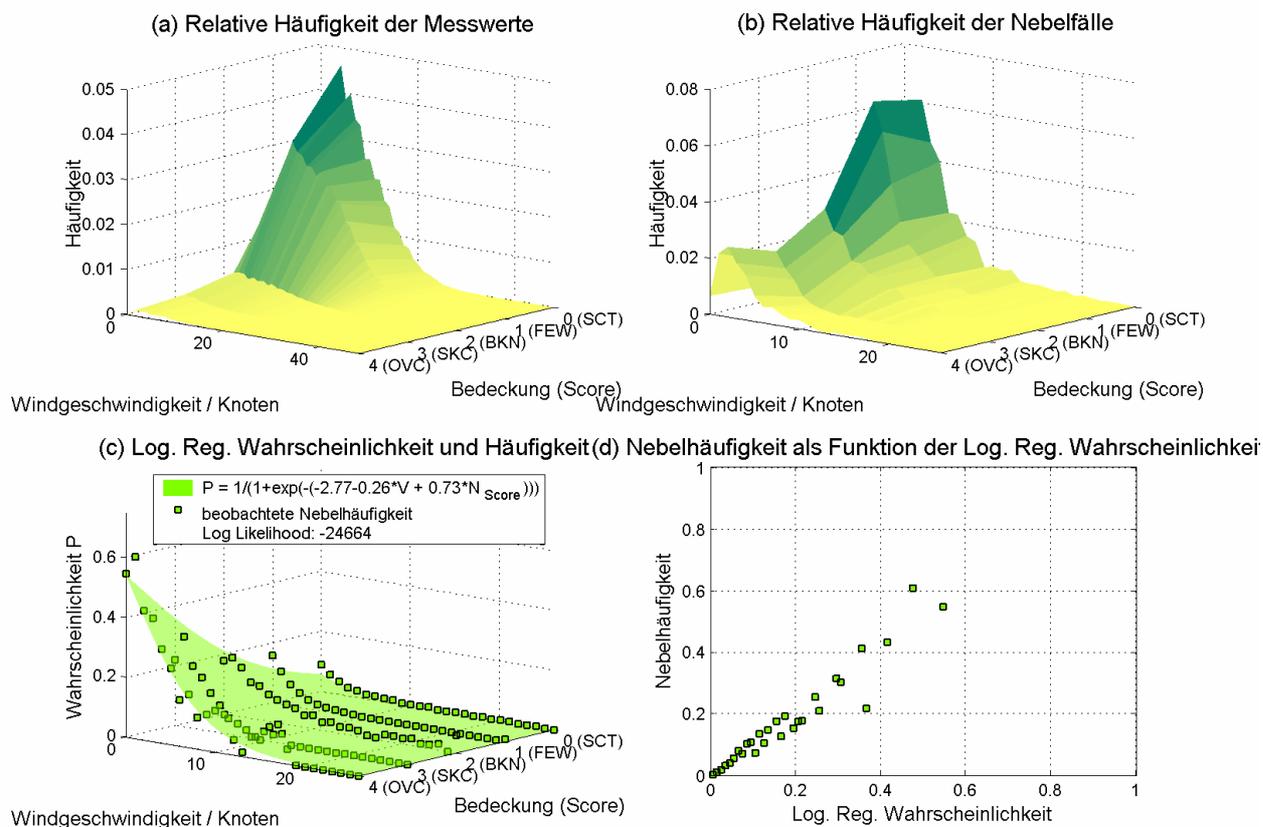
Im Fall von Nebel erkennt man eine Struktur, so ist die Wahrscheinlichkeit generell bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten höher. Auch zeigt sich wieder, dass die Wahrscheinlichkeit für Nebel bei einem Bedeckungsgrad zwischen 1/8 und 4/8 (FEW und SCT) am höchsten ist, was auch dem Ergebnis aus der Abbildung 5-6 entspricht.

Die berechnete Regressionsgleichung für die Parameter Windgeschwindigkeit und Temperatur ist in der Graphik als hellgrüne Fläche dargestellt (Abbildung 5-9 (c)). Die grünen Vierecke markieren hierbei die beobachteten Häufigkeiten. Die beobachtete Wahrscheinlichkeit gegen die aus der logistischen Regression berechneten Wahrscheinlichkeiten aufgetragen (Abbildung 5-9 (d)), ergibt einen guten Zusammenhang, da hier die Werte annähernd an der 45° - Geraden liegen. Allerdings beträgt der  $R^2$  Werte bescheidene 0,19, was einem akzeptablen Wert entspricht.

Der Spread hat bereits bei der Einzelauswertung ein beachtliches Ergebnis mit der geringsten Devianz und dem höchsten  $R^2$  Wert. Daher ist es sinnvoll diesen Parameter auch

für kombinierte Regressionen zu verwenden. Die erste Kombination des Spreads ist in Abbildung 5-10 dargestellt. Dabei wird der Spread mit der Bedeckung verknüpft.

Interessant ist die Graphik, in der die aus der logistischen Regression berechneten Wahrscheinlichkeiten gegen die beobachteten Nebelhäufigkeiten aufgetragen ist (Abbildung 5-10 (d)). Da die daraus resultierenden Vierecke nahe der Diagonalen liegen, spricht dies für eine gute Anpassung. Der Spread alleine weist einen  $R^2$  - Koeffizienten von 0,401 auf, zusammen mit der Bewölkung ließ sich dieser auf 0,423 verbessern.



**Abbildung 5-9 Multiple Logistische Regression für Nebel mit den Parametern Windgeschwindigkeit und Bedeckung. Auswertung der Jahr 1990 bis 2004**

Die letzte hier angeführte multiple Regression mit zwei Parametern wird aus dem Spread und der Windgeschwindigkeit berechnet, und die Ergebnisse sind in Abbildung 5-11 dargestellt.

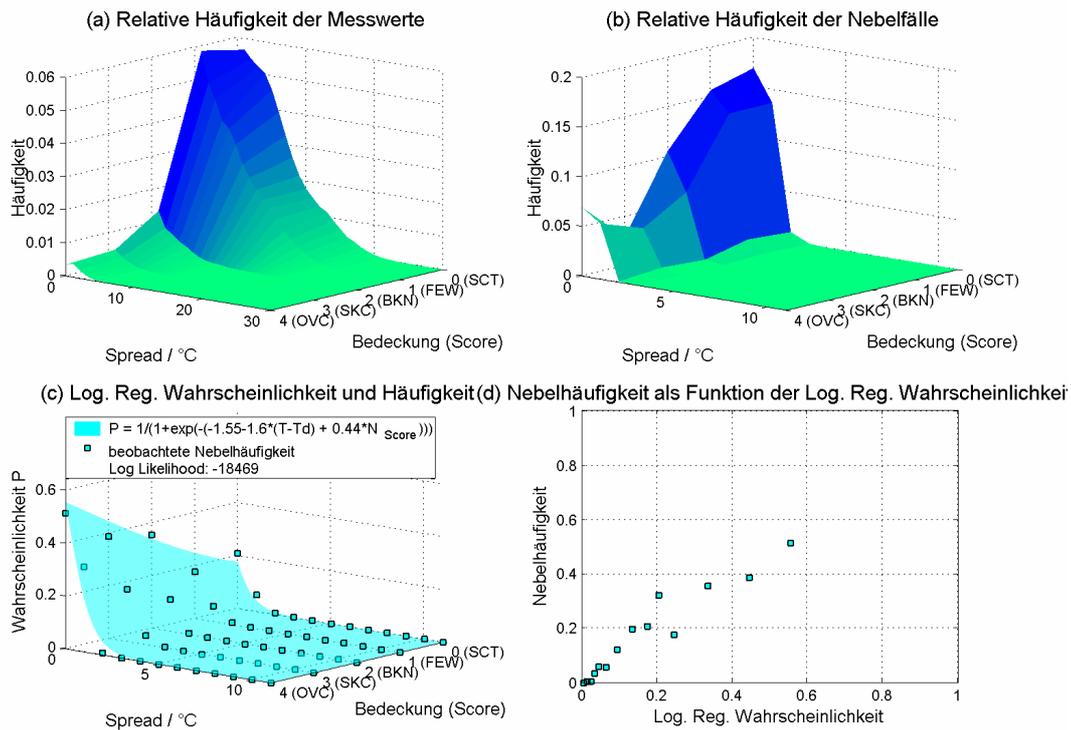


Abbildung 5-10 Multiple logistische Regression für Nebel mit den Parametern Spread und Bedeckung. Auswertung der Jahre 1990 bis 2004

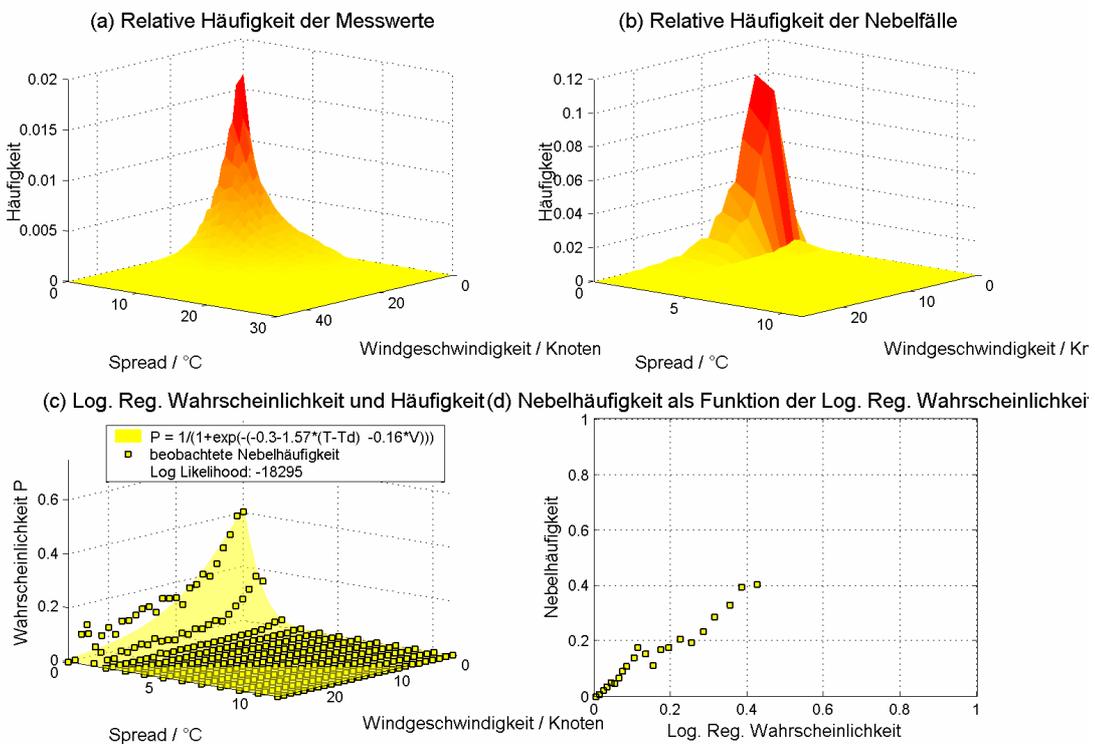
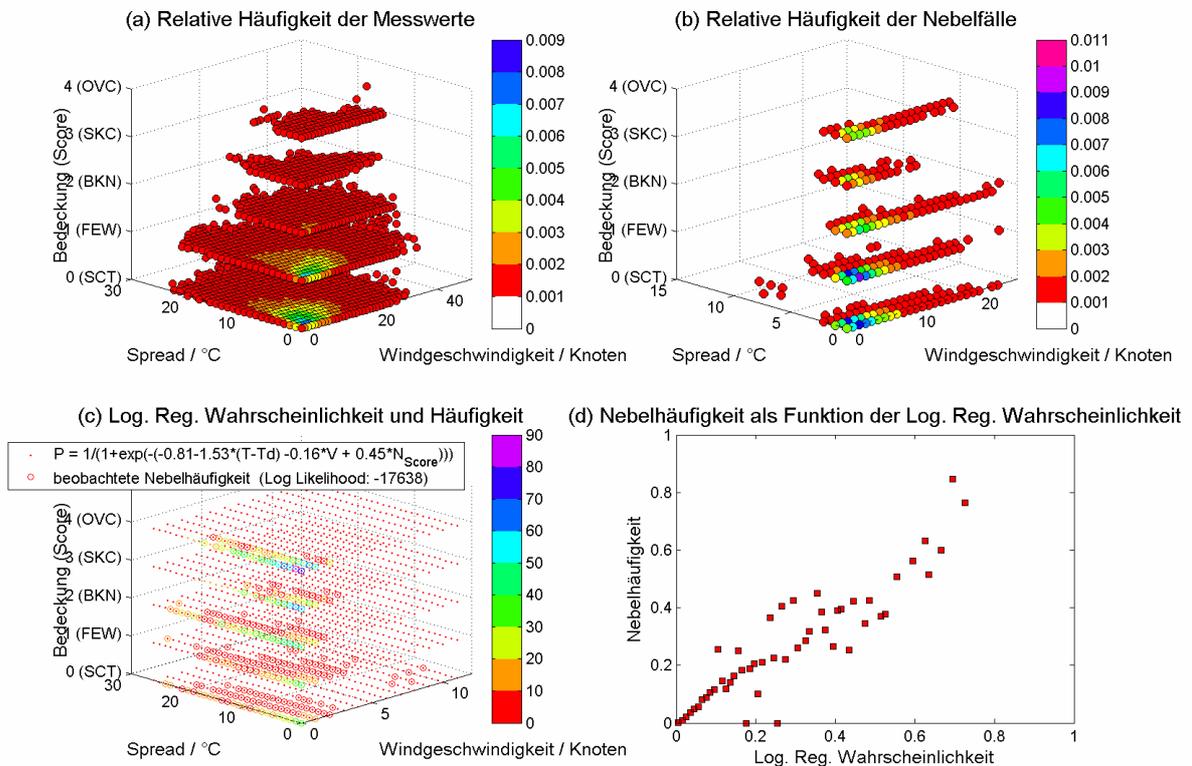


Abbildung 5-11 Multiple logistische Regression für Nebel mit den Parametern Spread und Windgeschwindigkeit. Auswertung der Jahre 1990 bis 2004.

Die Elemente Spread und Windgeschwindigkeit sind bereits bei der Auswertung der einzelnen Parameter zwei der aussagekräftigsten. So ist es auch bei der Kombination der Fall. Die Graphik der beobachteten Nebelhäufigkeit gegen die berechneten Wahrscheinlichkeiten (Abbildung 5-11(d)) lässt schon auf eine gute Anpassung schließen. Vergleicht man dies nun mit dem  $R^2$  - Wert von 0,428 so zeigt sich eine Verbesserung und eine gute Anpassung.

In Abbildung 5-12 ist eine multiple Regression mit den Parametern Bedeckung, Spread und Windgeschwindigkeit dargestellt. Da mit drei Parametern keine flächenhafte Darstellung mehr möglich ist, werden hier verschiedenfarbige Punkte verwendet. Dabei ist im oberen Bereich die Verteilung der Messwerte (Abbildung 5-12(a) und (b)), links aller Meldungen und rechts der Nebelmeldungen angeführt.

Die berechnete logistische Regression ist in Abbildung 5-12(c) abgebildet. Nach dem Bild rechts unten (Abbildung 5-12(d)) zeigt sich jedoch, dass auch bei diesen drei Parametern eine gute Übereinstimmung zwischen beobachteten Häufigkeiten und berechneten Wahrscheinlichkeiten erfolgt. Dies wird auch mit einem  $R^2$  von 0,45 belegt.



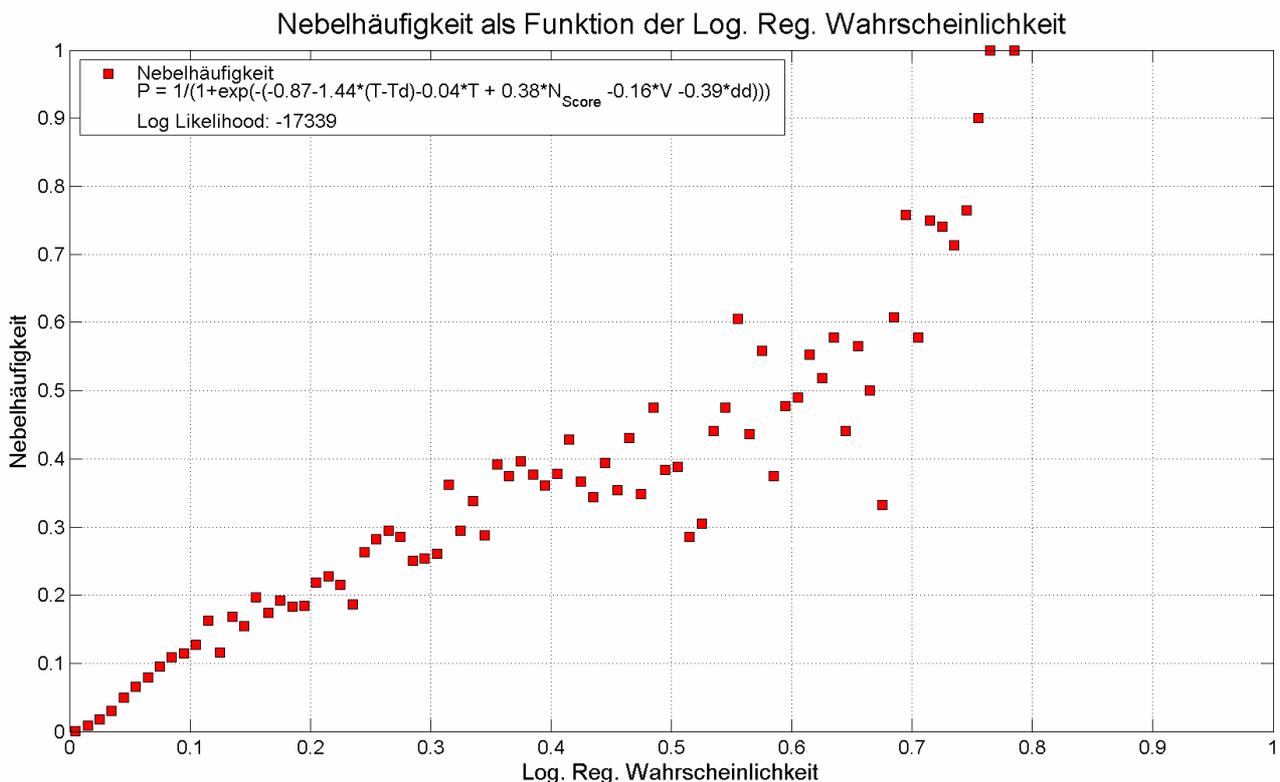
**Abbildung 5-12 Multiple Logistische Regression für Nebel mit den Parametern Bedeckung, Spread, Windgeschwindigkeit. Auswertung der Jahre 1990 bis 2004**

Mit der höheren Anzahl an Einflussgrößen erfolgt auch eine deutliche Verbesserung der vorhergesagten Wahrscheinlichkeiten. So werden bei diesen drei Parametern bereits Wahrscheinlichkeiten von fast 80% erreicht.

Zum Abschluss wird eine multiple Regression mit fünf Einflussgrößen (Spread, Temperatur, Bedeckung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung) berechnet.

Da eine Darstellung in der Form der letzten Abbildung bei fünf Parametern nicht möglich ist, wird in Abbildung 5-12 lediglich die Nebelhäufigkeit als Funktion der aus der logistischen Regression berechneten Wahrscheinlichkeiten gezeigt.

Im Bereich der geringeren Wahrscheinlichkeit entsprechen die Punkte einer 45° - Geraden und sprechen somit für eine verlässliche Vorhersage. Auffällig ist, dass keine berechneten Wahrscheinlichkeiten über der 0,8 Schranke liegen. Im Bereich von 0,5 bis 0,7 ist die Punktwolke relativ breit gestreut. Zusammenfassend werden mit dieser Regressionsgleichung gute und brauchbare Ergebnisse erzielt. Der entsprechende  $R^2$  Wert von 0,464 spricht auch für eine gute Modellanpassung.



**Abbildung 5-13 Multiple Logistische Regression für Nebel mit den Parametern Spread, Temperatur, Bedeckung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Auswertung der Jahre 1990 bis 2004**

Mit den sechs Parametern Spread, Temperatur, Bedeckung, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Monat wird ebenfalls eine Regression berechnet. Auch hier zeigt sich eine Verbesserung des Nagelkerke  $R^2$  (0,476), jedoch werden bei der Vorhersage keine signifikant höheren Wahrscheinlichkeiten prognostiziert. Daher kann die in Abbildung 5-13 dargestellte Regression als Endergebnis angesehen werden.

In Kapitel 6 wird auf die Güte einer Prognose mit dieser Gleichung als Grundlage näher eingegangen. Dazu werden Vorhersagen aus unabhängigen Daten (den METAR Meldungen des Flughafens Wien Schwechat aus den Jahren 2005 bis 2007) mit verschiedenen Verifikationsmaßen beurteilt.

### 5.2.2.2 Hochnebel

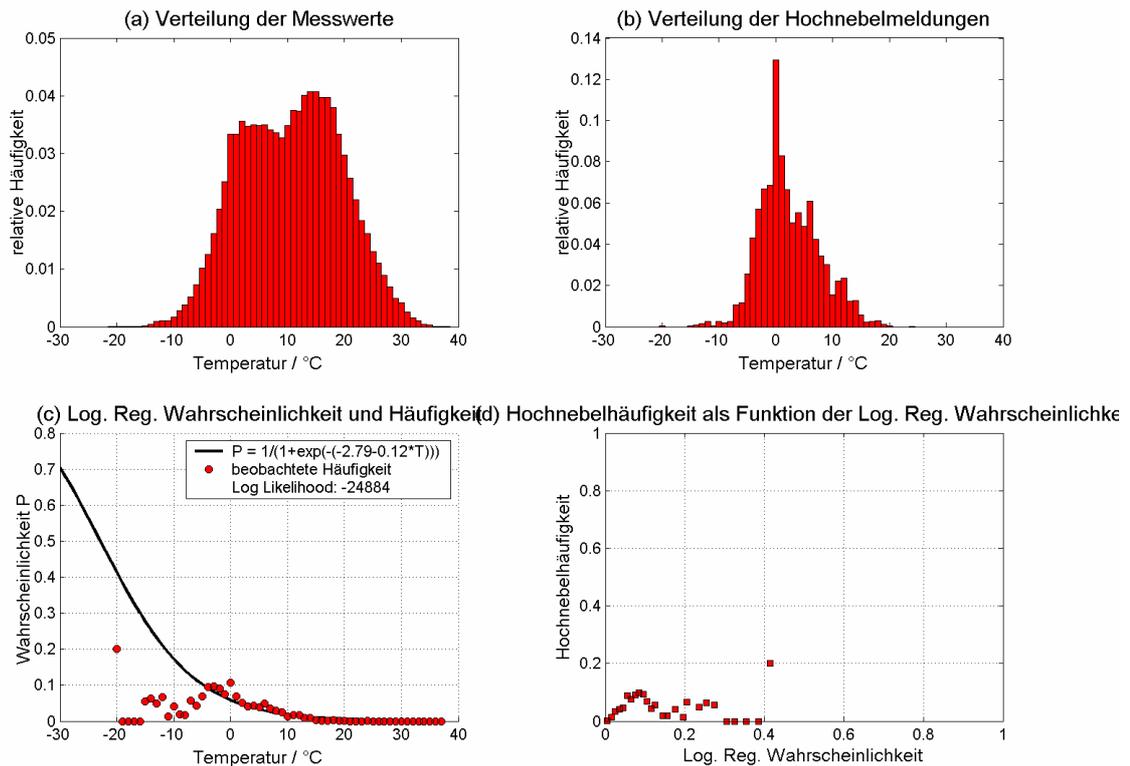
Da für den Nebel recht gute Resultate erzielt wurden, ist dieses Verfahren der logistischen Regression auch auf den in Kapitel 4.3.1 definierten Hochnebel angewandt worden.

Die logistische Regression ist für den Hochnebel durchaus anwendbar, jedoch werden für den Nebel bessere Ergebnisse erzielt. Ein möglicher Grund dafür ist, dass der Hochnebel nicht über eine „saubere“ meteorologische Definition dargelegt ist. Im Folgenden werden die einzelnen und kombinierten Parameter beschrieben. Die Abbildungen sind in derselben Form wie bereits zu Beginn des Kapitels beschrieben.

- *Temperatur, Taupunkt und Spread*

Auch im Fall des Hochnebels verlaufen die Graphiken bei Temperatur und Taupunkt sehr ähnlich, daher wird im weiteren nur die Temperatur besprochen, diese ist in Abbildung 5-14 dargestellt.

In Abbildung 5-14 (c) ist die berechnete logistische Regression abgebildet, nach dieser würde die Wahrscheinlichkeit für Hochnebel steigen, je tiefer die Lufttemperatur ist. Die beobachteten Häufigkeiten (in der Graphik mit roten Punkten eingezeichnet) decken sich mit der Regressionskurve gut bis zu einer Temperatur von etwa  $-5^{\circ}\text{C}$ . Danach fallen die beobachteten Häufigkeiten ab, während die Regressionskurve markant weiter steigt. Vergleicht man dieses Ergebnis mit Abbildung 5-2 so zeigt sich, dass beim Nebel eine bessere Anpassung erfolgt. Ein Grund dafür ist, dass so tiefe Temperaturen in Schwechat klimatologisch gesehen selten auftreten, dafür aber verhältnismäßig oft Nebel auftritt, Hochnebel jedoch in diesem Temperaturbereich ein noch selteneres Phänomen ist. Dies wird verdeutlicht, wenn man sich in Abbildung 5-14 und in Abbildung 5-2 jeweils die Häufigkeitsverteilungen im oberen Bereich ansieht. Das Auftreten von Nebel und Hochnebel in einem geringen Temperaturbereich wurde bereits in Kapitel 4 besprochen.



**Abbildung 5-14 Auswertung der Temperatur für Hochnebel aus den Jahren 1990 bis 2004**

In der Abbildung 5-14(d), in welcher die beobachtete Nebelhäufigkeit gegen die berechnete Nebelwahrscheinlichkeit aufgetragen ist, folgen die Punkte zu Beginn einer 45° - Geraden. Da die logistische Regressionsgleichung mit sinkender Temperatur höhere Wahrscheinlichkeiten liefert, zeigt sich für höhere Wahrscheinlichkeiten eine schlechtere Anpassung. Sowohl der  $R^2$  Wert für die Temperatur (0,115), als auch für den Taupunkt (0,031) deutet ebenfalls auf eine schlechtere, wenn auch nicht markant, Anpassung hin als beim Nebel.

Wie bereits beim Nebel tritt auch Hochnebel fast ausschließlich in Verbindung mit einer geringen Temperatur – Taupunkts – Differenz auf und liefert dementsprechend eine gute Anpassung ( $R^2 = 0,367$ ), was gleichzeitig dem höchste  $R^2$  Wert der einzelnen Parameter entspricht. Vom Betrag her erhält man niedrigere Werte als beim Nebel. Hohe Wahrscheinlichkeit werden bei der Regressionsgleichung ausschließlich für eine Differenz von 0°C, 1°C und 2°C erzielt.

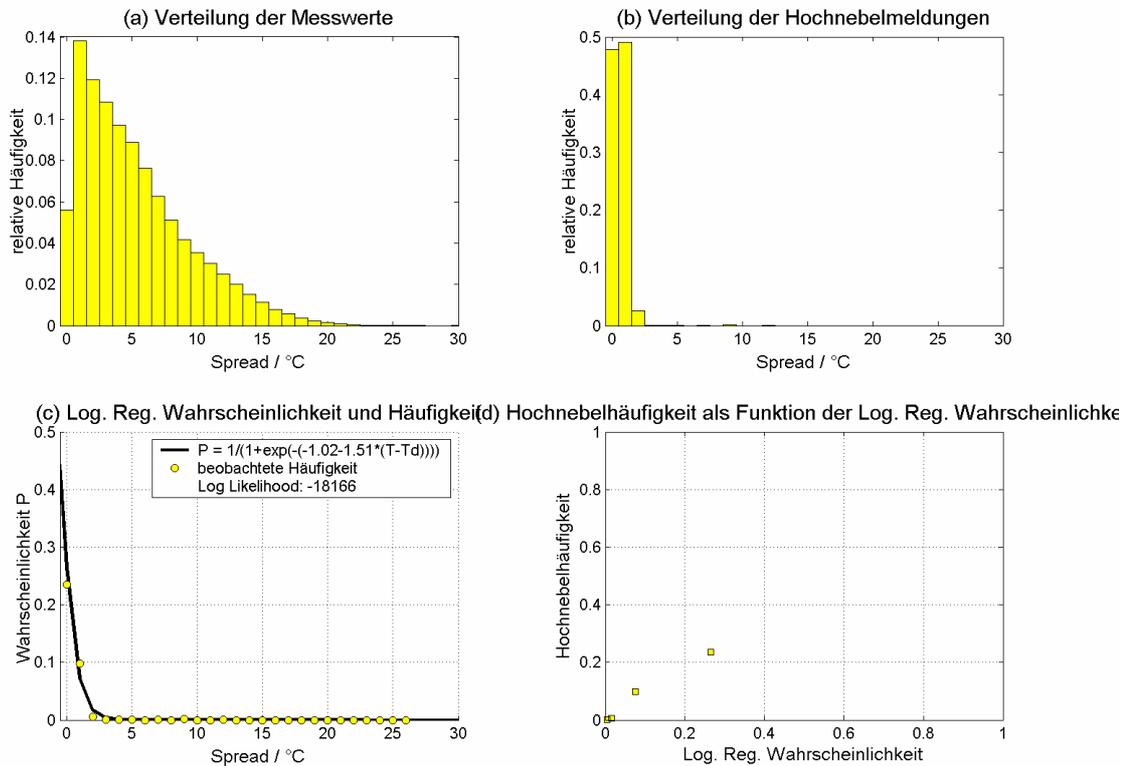
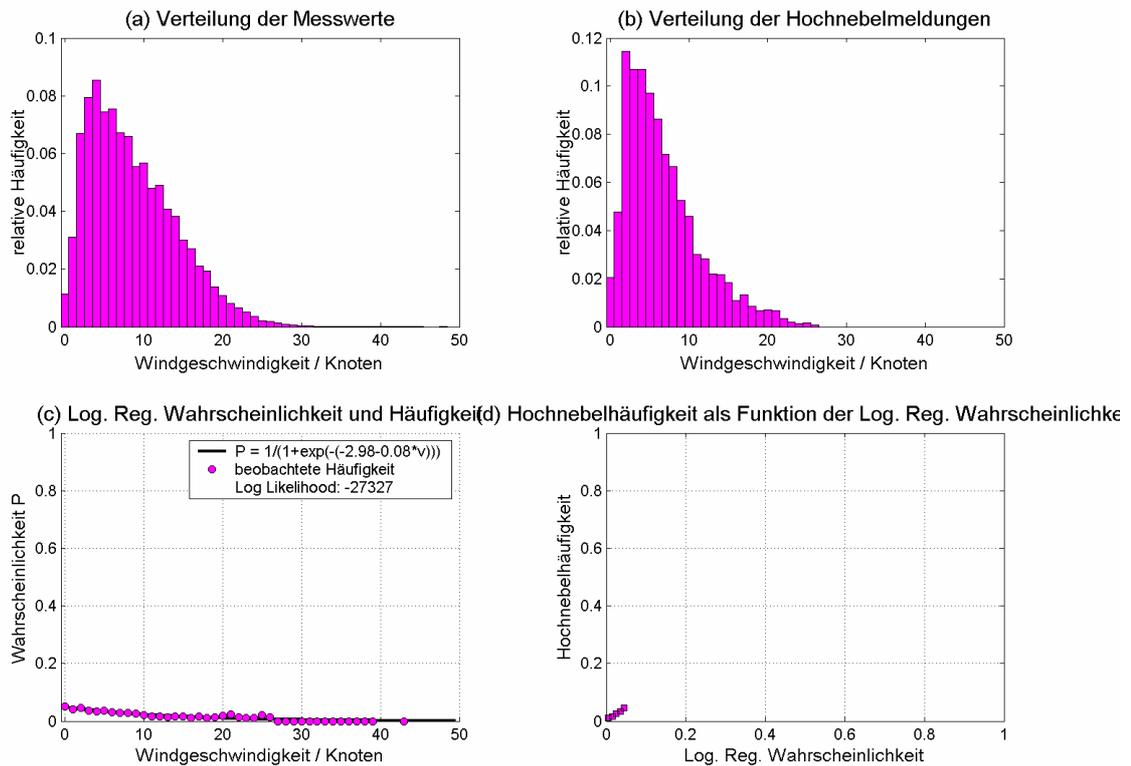


Abbildung 5-15 Auswertung des Spreads für Hochnebel der Jahre 1990 bis 2004

• **Windgeschwindigkeit und Windrichtung**

Die Resultate des Elementes Windgeschwindigkeit sind in Abbildung 5-16 (a) bis (d) dargestellt. In dem Fall ist die Regressionskurve sehr flach. Einerseits tritt Nebel bei Windgeschwindigkeiten unter 10kt tendenziell häufiger auf, andererseits spricht eine niedrige Windgeschwindigkeit noch nicht für eine hohe Nebelwahrscheinlichkeit. Die beobachteten Häufigkeiten in Abbildung 5-16 (c), liegen zwar entlang der Regressionskurve, allerdings spricht ein Nagelkerkes  $R^2$  von 0,021 für eine weniger gute Anpassung.

In Abbildung 5-16 (d) ist die beobachtete Häufigkeit gegen die aus der logistischen Regression berechnete Wahrscheinlichkeit abgebildet. Hier folgen die Punkte zwar einer 45° - Geraden, aber sie bewegen sich in einem sehr geringen Wahrscheinlichkeitsbereich. Somit ist belegt, dass die Nebelwahrscheinlichkeiten zwar über die Windgeschwindigkeiten richtig vorhergesagt werden, allerdings lässt sich über diesen Parameter keine eindeutige Aussage zur Nebelbildung ableiten.



**Abbildung 5-16 Auswertung der Windgeschwindigkeit für Hochnebel der Jahre 1990 bis 2004**

Bei der Windrichtung liefert, wie bereits beim Nebel (klassische Verteilung der Windrichtung von Nordost (10°) über Ost, Süd und West bis Nord (360°)), die berechnete logistische Regression kein brauchbares Ergebnis. Wiederum wird in diesem Fall die Windrichtung mit derselben Sinusfunktion linearisiert. Somit ist aus den Graphiken in Abbildung 5-17 die Windrichtung nicht mehr eindeutig bestimmbar.

Bei der Windrichtung beschreiben die beobachteten Häufigkeiten (vgl. Abbildung 5-17(c)), zwar annähernd die Regressionskurve, jedoch sind diese weit gestreut. Weiters werden keine hohen Wahrscheinlichkeiten für Hochnebel prognostiziert. In der Abbildung 5-17(d) ist die beobachtete Häufigkeit gegen die aus der logistischen Regression berechneten Wahrscheinlichkeiten aufgetragen. Hier spiegelt sich das Bild wider, dass zwar beobachtete Häufigkeiten und berechnete Wahrscheinlichkeiten annähernd zusammen passen, jedoch keine hohen Wahrscheinlichkeiten erzielt werden. Auch der  $R^2$  Koeffizient von 0,099 spricht für keine sehr gute Anpassung.

Für den Hochnebel erscheint eine Auswertung der Strömungsrichtungen in 850hPa sinnvoller und würde wahrscheinlich ein brauchbareres Ergebnis liefern, als die Auswertung der Bodenwindrichtung. Diese wurde in dieser Arbeit nicht berechnet, da der METAR Code ausschließlich Bodenmeldungen enthält.

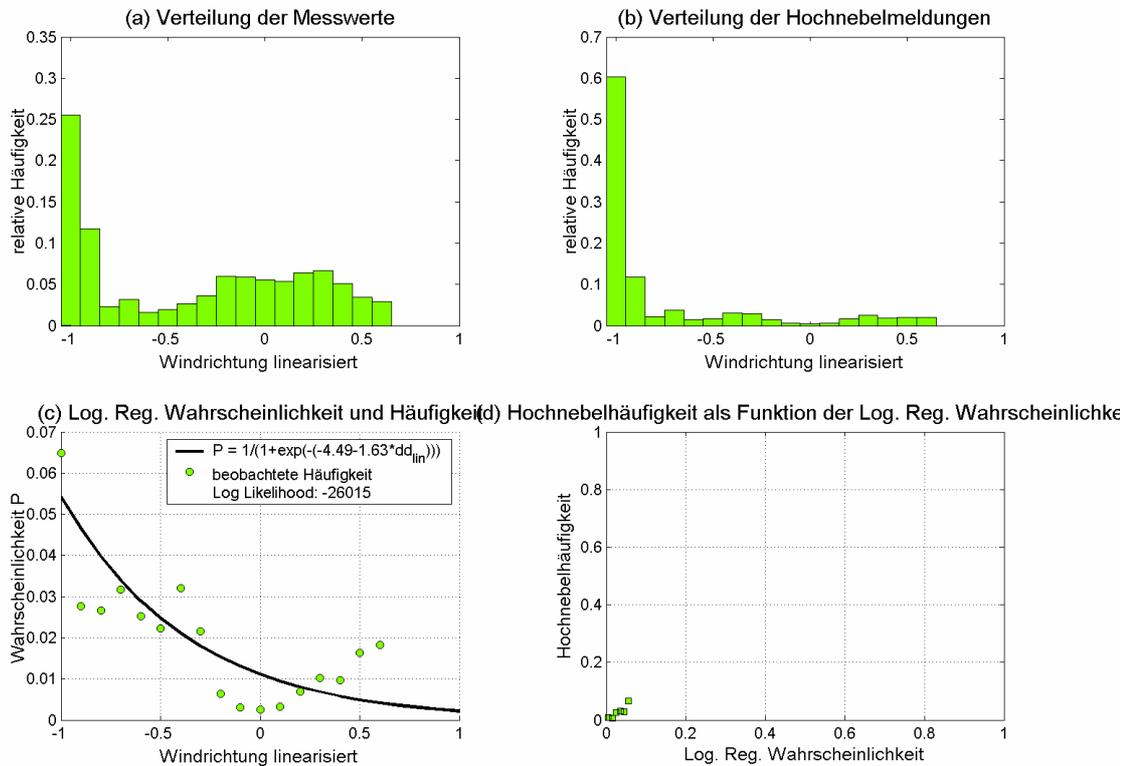
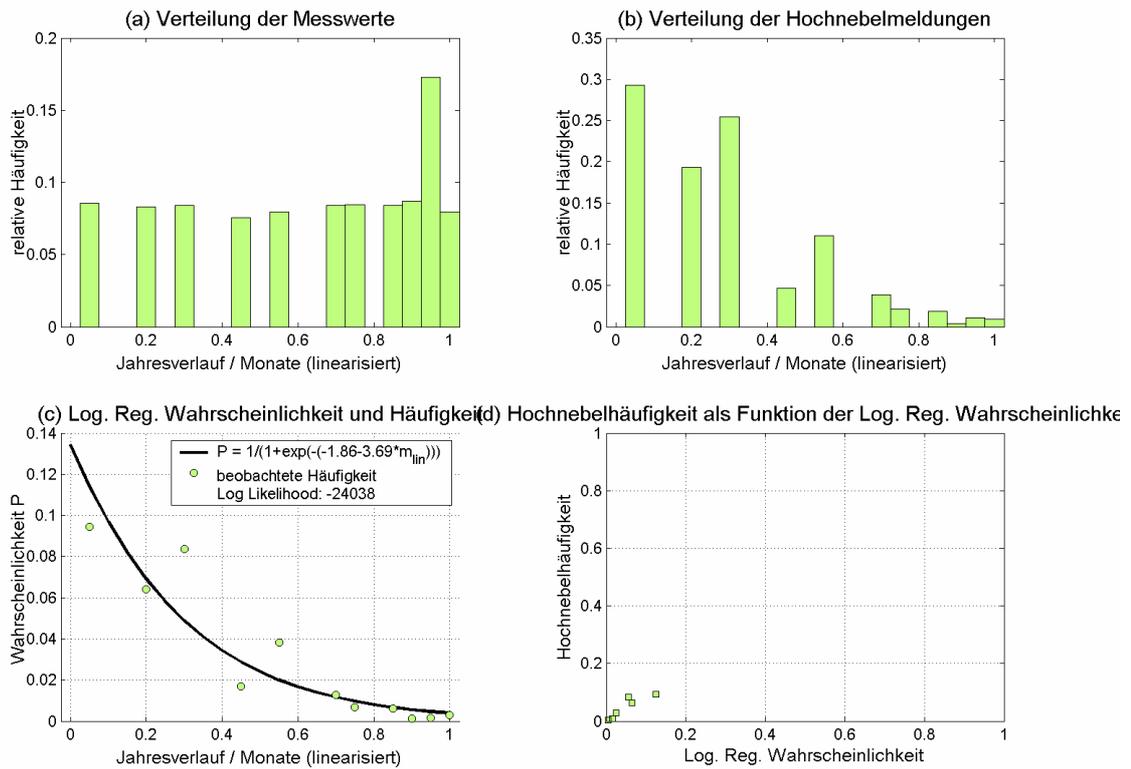


Abbildung 5-17 Auswertung der Windrichtung für Hochnebel der Jahre 1990 bis 2004

- **Jahresverlauf und Tagesverlauf**

In Abbildung 5-18 ist die Auswertung der einzelnen Monate dargestellt. Wie bereits beim Nebel, lässt sich aus der herkömmlichen Darstellung mit Jänner bis Dezember keine gute Anpassung erzielen. Daher werden die Monate abermals mit der Sinusfunktion  $\sin(2 * \pi * \text{Monat} / 24 - 0.035)$  linearisiert.

In Abbildung 5-18(c) ist die Regressionsgerade mit der Regressionsgleichung und den beobachteten Häufigkeiten dargestellt. Auch der  $R^2$  Koeffizient von 0,173 zeigt, dass die Monate für die Nebelprognose einen wichtigen Parameter darstellen. Gewisse Monate begünstigen klimatologisch gesehen Hochnebel (siehe Kapitel 4) und dies spiegelt sich auch bei dieser Auswertung wider.



**Abbildung 5-18 Auswertungen des Jahresverlaufs (der einzelnen Monate) für Hochnebel der Jahre 1990 bis 2004.**

Beim Tagesverlauf treten zwar die meisten Hochnebefälle zwischen 5 Uhr UTC und 10 Uhr UTC auf, jedoch beeinflusst die Uhrzeit das Ergebnis der logistischen Regression nur in geringem AusmaÙe. Auch hier wurde der Verlauf mit der bereits schon für den Nebel verwendeten Sinusfunktion linearisiert. Da die Uhrzeit nur sehr geringe Wahrscheinlichkeiten berechnet, wird diese Abbildung an dieser Stelle nicht angeführt.

• **Kombinierte Regressionsgleichungen**

Auch für den Hochnebel werden, um eine Verbesserung der vorhergesagten Wahrscheinlichkeiten zu erzielen, kombinierte Regressionsgleichungen berechnet. Dazu werden die folgenden Parameter gekoppelt:

- Spread und Jahresverlauf (Abbildung 5-19)
- Spread und Windrichtung (Abbildung 5-20)
- Spread mit Jahresverlauf und Windrichtung (Abbildung 5-21)
- Spread, Jahresverlauf, Windrichtung und Temperatur (Abbildung 5-22)

Auch bei den verknüpften Regressionen werden bei Nebel bessere Ergebnisse als bei der Hochnebelprognose erlangt. Die berechneten Kombinationen werden im Folgenden dargestellt, wobei immer nur die Hochnebelhäufigkeit als Funktion der aus der logistischen Regression berechneten Wahrscheinlichkeiten dargestellt wird.

Die Windrichtung und der Jahresverlauf werden in derselben Form wie bereits bei der Einzelauswertung linearisiert.

Unter diesen vier Parametern ist der Spread die stärkste Einflussgröße. Die Nagelkerkes  $R^2$  Werte weisen eine gute Anpassung mit Werten von 0,412 (Spread und Jahresverlauf vgl. Abbildung 5-19), 0,402 (Spread und Windrichtung vgl. Abbildung 5-20), 0,433 (Spread, Jahresverlauf und Windrichtung vgl. Abbildung 5-21) und 0,435 (Spread, Jahresverlauf, Windrichtung und Temperatur vgl. Abbildung 5-22) auf.

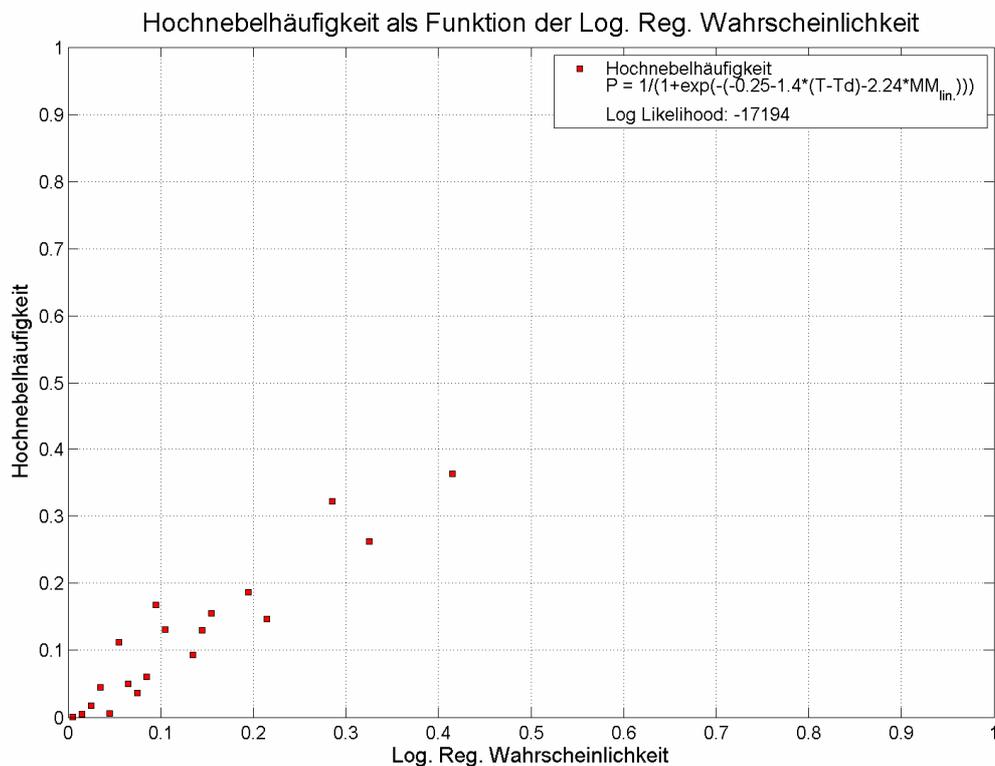


Abbildung 5-19 Auswertung von Spread und Jahresverlauf für Hochnebel aus den Jahren 1990 bis 2004

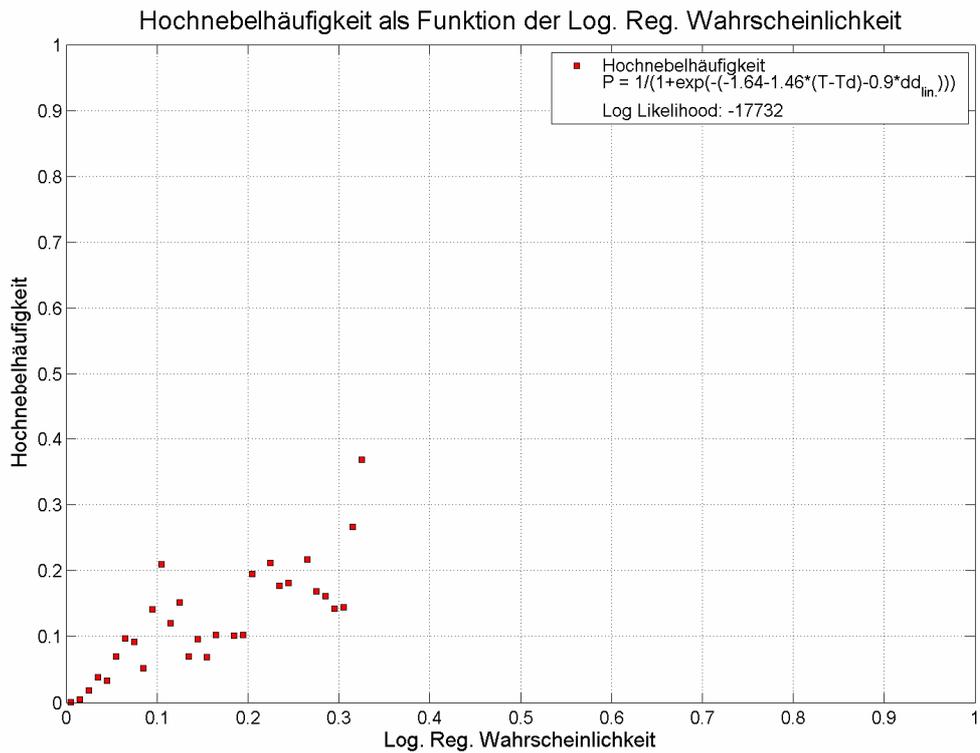


Abbildung 5-20 Auswertung von Spread und Windrichtung (linearisiert) für Hochnebel aus den Jahren 1990 bis 2004

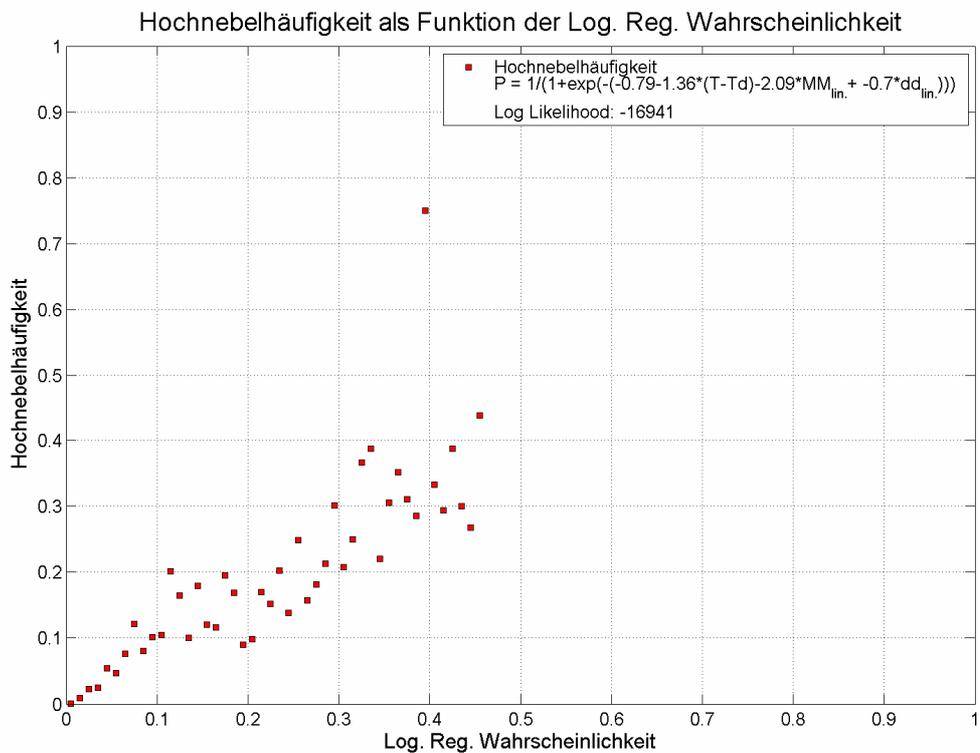


Abbildung 5-21 Auswertung von Spread, Jahresverlauf und Windrichtung (linearisiert) für Hochnebel aus den Jahren 1990 bis 2004

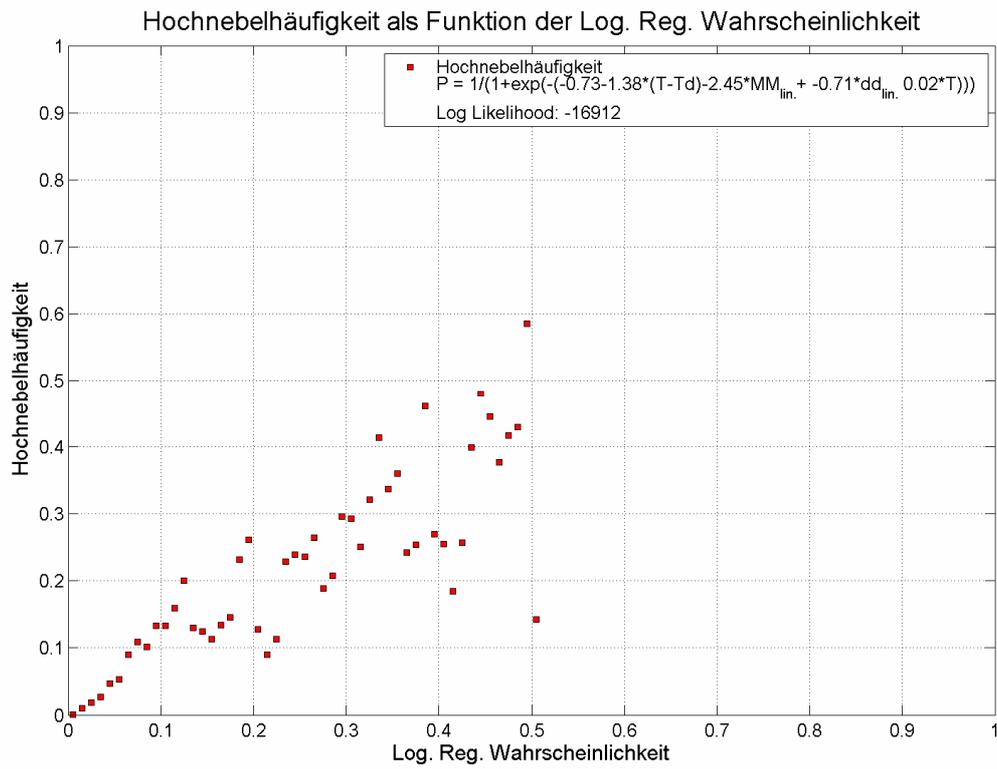


Abbildung 5-22 Auswertung von Spread, Jahresverlauf, Windrichtung und Temperatur für Hochnebel aus den Jahren 1990 bis 2004

### 5.2.2.3 Fazit

Nebel ist ein sehr komplexes Phänomen und ist praktisch nicht von einem einzelnen Parameter vorherzusagen. Die multiple logistische Regression erweist sich als geeignete Methode, Nebelwahrscheinlichkeiten zu prognostizieren.

Das Endergebnis ist eine aus den Parametern Spread, Temperatur, Bedeckung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung für den Bodennebel und aus Spread, Jahresverlauf, Windrichtung und Temperatur für den Hochnebel entwickelte Regressionsgleichung. Bei beiden Regressionsberechnungen wird eine Nagelkerkes  $R^2$  über 0,4 erzielt, was für eine gute Modellanpassung spricht.

## 6 Verifikation

*Forecast Verification is the process of assessing the quality of forecasts*

Wilks (2006) [23]

Da mit Hilfe von Verifikationsmethoden eine Aussage über die Güte einer Prognose getroffen werden kann, spielt die Verifikation in der Meteorologie eine bedeutende Rolle.

Dieses Kapitel widmet sich der Überprüfung der Wahrscheinlichkeitsaussagen, die mit der logistischen Regression getroffen werden.

Als Quelle für dieses Kapitel diene hauptsächlich *D.S. Wilks, Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, 2006*.

### 6.1 Grundlagen

Eine Vielzahl an Verifikationsmaßen wurde bereits entwickelt und an verschiedene Bedingungen angepasst. Diese sollen über die Güte, aber auch über die Schwachstellen einer Prognose Auskunft geben. Jedoch muss das Maß sorgfältig ausgewählt werden, da bei unterschiedlichen Methoden das Augenmerk auf anderen Gesichtspunkten liegt.

Im Folgenden werden Verifikationsmaße beschrieben, die im Weiteren auch für die Analyse der mit der logistischen Regression erstellten Wahrscheinlichkeitsprognosen verwendet werden.

#### 6.1.1 Brier Score

Der *Brier Score* ist eines von vielen Maßen, die sich für die Verifikation von dichotomen Vorhersagen eignet. Er ist mit dem mittleren quadratischen Fehler einer Wahrscheinlichkeitsvorhersage gleichzusetzen. Um ihn zu berechnen, verfährt man wie in (6.1) beschrieben.

$$BS = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k)^2 \quad 0 \leq BS \leq 1 \quad (6.1)$$

Man hat einen Datensatz mit  $n$  Vorhersagepaaren, bestehend aus einer Beobachtung und einer Vorhersage. Wenn das Ereignis eintritt, ist die Beobachtung  $o_1 = 1$  bzw.  $o_2 = 0$ , wenn das erwartete Ereignis nicht beobachtet wird. Die Vorhersagewahrscheinlichkeit  $y_k$  kann jeden Wert zwischen 0 und 1 annehmen. Der Brier Score ist negativ orientiert, was bedeutet,

dass  $BS = 0$  einer perfekten Prognose entspricht. Je höher der Wert, desto ungenauer ist die Vorhersage.

Ein *Skill Score* dient immer dazu, die Leistung gegenüber einer Referenzprognose zu erhalten. Dabei ist die Referenzprognose meist entweder eine klimatologische, eine rein zufällige oder eine Persistenz Prognose. In der allgemeinen Form wird ein *Skill Score* nach der (6.2) berechnet:

$$SS = \frac{A - A_{ref}}{A_{perf} - A_{ref}} \quad (6.2)$$

Ein *Skill Score* wird immer im Bezug zu einem Fehlermaß gesetzt.  $A$  deklariert jedes beliebige Maß.  $A_{ref}$  steht für die Referenz- und  $A_{perf}$  für die perfekte Prognose. Daraus folgt für den *Brier Skill Score*:

$$BSS = \frac{BS - BS_{ref}}{0 - BS_{ref}} = 1 - \frac{BS}{BS_{ref}} \quad (6.3)$$

Handelt es sich um eine perfekte Prognose, so nimmt der *Brier-Score* Werte 0 an, damit kann die Formel (6.3) auch in der vereinfachten Form geschrieben werden.

### 6.1.2 Reliability Diagram

Verifikationsmaße, wie der *Brier Score*, verschaffen einen schnellen Überblick über die Güte der Prognose, die sie mit einem Wert angeben. Um eine vollständigere Beurteilung der Vorhersagequalität zu erlangen und es dennoch übersichtlich zu halten, eignen sich besonders graphische Verifikationsmethoden. Eine von diesen ist das *Reliability Diagram*, welches speziell für Wahrscheinlichkeitsprognosen von dichotomen Ereignissen geeignet ist. Um eine aussagekräftige Graphik zu erlangen, werden die Prognosen zunächst in Klassen eingeteilt (hier in 10% Schritte). Zu jeder Vorhersage ist eine Beobachtung vorhanden. Daher werden diese Klassen zusätzlich noch in die Kategorien „JA“ (eingetreten) und „NEIN“ (nicht eingetreten) unterteilt. Mit Hilfe dieser Tabelle kann die *Beobachtungsfrequenz* berechnet werden. Diese wird für jede Klasse kalkuliert und setzt sich aus der in dieser Klasse vorhergesagten und beobachteten Ereignissen durch die Gesamtanzahl der Prognosen in der jeweiligen Klasse zusammen.

Danach wird die *Beobachtungsfrequenz* gegen die vorhergesagten Wahrscheinlichkeiten aufgetragen. Je nachdem wie die daraus resultierende Kurve zur Diagonalen (diese entspricht der perfekten Prognose) liegt, können Aussagen über die Prognosen getroffen werden. So zeigt sich ein „*Overforecasting*“ (der Event wird immer deutlich öfter

prognostiziert als beobachtet) und ein „*Underforecasting*“ (dabei wird das Ereignis deutlich weniger oft vorhergesagt, als es eingetreten ist) auf den ersten Blick. Bei einem „*Overforecasting*“ („*Underforecasting*“) liegt die Kurve systematisch unter (über) der Diagonalen. Aber auch an Hand der Steigung der Kurve gegenüber der Steigung der Diagonalen können Aussagen in Bezug auf die Resolution (entspricht Entschiedenheit) getroffen werden. So wird bei einer flachen Kurve das Nichtauftreten des Ereignisses unterschätzt bzw. das Auftreten desselben überschätzt. Bei einer steilen Kurve verhält es sich dementsprechend entgegengesetzt. Zieht man die „reine Klimatologie“ als Prognose heran, so wäre das Resultat eine waagrechte Gerade.

### 6.1.3 ROC - Kurve (Relative Operating Characteristic)

Diese graphische Methode eignet sich um Wahrscheinlichkeitsprognosen auf das Eintreten eines Ereignisses zu verifizieren. Dabei werden die vorhergesagten Wahrscheinlichkeiten mit Hilfe von Schwellwerten in Kontingenztabelle, mit den Kategorien „JA“ (eingetreten / erwartet) und „NEIN“ (nicht eingetreten / nicht erwartet), verwandelt (siehe Tabelle 6.1).

So erhält man für jeden Schwellwert eine Kontingenztabelle, für die jeweils die „*False Alarm Rate*“ (6.5) („JA“ Vorhersagen, die nicht eingetreten sind, durch die Anzahl der „NEIN“ Beobachtungen) und die „*Hit Rate*“ (6.4) („JA“ Vorhersagen, die eingetreten sind, durch die Gesamtanzahl aller „JA“ Beobachtungen) berechnet wird. Anschließend wird an der x - Achse die „*False Alarm Rate*“ und an der y - Achse die „*Hit Rate*“ aufgetragen.

		Beobachtung		
		JA	NEIN	
Vorhersage	JA	a	b	a+b
	NEIN	c	d	c+d
		a+c	b+d	n

Tabelle 6.1 Schema einer Kontingenztabelle

$$\text{Hit Rate: } H = \frac{a}{a+c} \quad (6.4)$$

$$\text{False Alarm Rate: } F = \frac{b}{b+d} \quad (6.5)$$

Aus dem ROC – Diagramm kann man simpel herauslesen, ob bei einem Datensatz an Wahrscheinlichkeitsprognosen eine „JA – NEIN“ Unterscheidung stark ausgeprägt ist.

Bei der perfekten Prognose gibt es nur zwei Werte, nämlich  $H=1$  und  $F=0$ , während bei einer Zufallsprognose mit klimatologischen Wahrscheinlichkeiten das Ergebnis einer Gerade entlang der Diagonalen ist, da für jede Kategorie die *Hit Rate* gleich der *False Alarm Rate* ist. Jedoch liegt in der Realität eine berechnete ROC – Kurve im Allgemeinen zwischen diesen beiden Extremen. Je besser die Vorhersage zwischen den zwei Ereignissen unterscheiden

kann, desto steiler steigt die Kurve nach 1, beziehungsweise desto weiter liegt die Kurve im linken oberen Bereich.

Abbildung 6-1 zeigt eine typische ROC – Kurve. Dabei wurde an 100 Tagen eine Wahrscheinlichkeitsprognose für das Element Niederschlag erstellt. Diese Niederschlagsprognosen wurden in einer Tabelle angeführt und anschließend Wahrscheinlichkeitsklassen, mit einem Abstand von 10%, unterteilt Ebenfalls wurde in der Tabelle der beobachtete Niederschlag, beziehungsweise wie häufig bei derselben Wahrscheinlichkeit kein Niederschlag eintrat, verzeichnet. Für jeden Schwellwert wurden Kontingenztabelle mit zwei mal zwei Kategorien erstellt, was in diesem Beispiel neun Kontingenztabelle entspricht. Die daraus berechneten *Hit Rates* und *False Alarm Rates* wurden dann als Wertepaare (H/F) in der Graphik eingetragen.

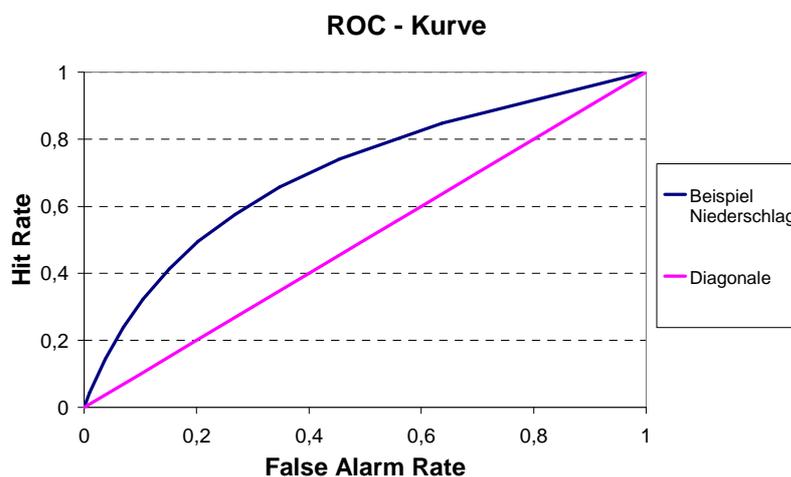


Abbildung 6-1 Beispiel einer ROC – Kurve

Quelle der Daten: Wilks (2006)

Will man die Aussage der ROC – Kurve zu einem einzelnen Wert zusammenfassen, so ist es üblich die Fläche unter der ROC – Kurve als Maßzahl heranzuziehen. Daher liefert die perfekte Prognose den Wert 1, bei einer Zufallsprognose bewegen sich die Werte um die Diagonale und die Fläche unter diesen Geraden ergibt 0,5. Für

das Beispiel in Abbildung 6-1 bedeutet dies, dass die Niederschlagsvorhersagen besser waren, als bei einer Zufallsprognose und die Fläche unter dieser Kurve entspricht einem Wert von 0,698. Daraus lässt sich schlussendlich auch ein *Skill Score* berechnen.

#### 6.1.4 Andere Verifikationsmaße

Für alle Wahrscheinlichkeitsprognosen von dichotomen Events können mit Hilfe eines Schwellwertes Kontingenztabelle gefertigt werden und auf diese Art eine Vielzahl an Verifikationsmaßen berechnet werden.

Da es sich bei Nebel um ein Extremereignis handelt, liefern nicht alle Maße zweckdienliche Ergebnisse, daher wurden nur die im Folgenden vorgestellten Methoden auch tatsächlich angewendet.

- **Proportion Correct:**

$$PC = \frac{a + d}{n} \quad (6.6)$$

Bei diesem Maß werden die korrekt vorhergesagten „JA“ und „NEIN“ Prognosen zusammengezählt und durch die Gesamtanzahl aller Prognosen dividiert. Das Ergebnis bewegt sich zwischen 0 und 1, wobei auch in dem Fall 1 einer perfekten Prognose entspricht. Im schlechtesten Fall erhält man den Wert 0. Allerdings kann ein Prognostiker, vor allem bei Extremereignissen, den *Proportion Correct* stark beeinflussen, wenn er beispielsweise ein seltenes Ereignis nicht vorhersagt, kann der Prognostiker das Resultat leicht verbessern.

Multipliziert man den PC mit 100% so erhält man den *Percent Correct*, also den Prozentsatz der richtigen Vorhersagen.

- **Post Agreement:**

$$\frac{a}{a + b} \quad \text{für die „JA“ Kategorie} \quad (6.7)$$

$$\frac{d}{c + d} \quad \text{für die „NEIN“ Kategorie} \quad (6.8)$$

Bei der perfekten Prognose kommt ein Wert von 1 heraus.

Man geht von den Vorhersagen, welche für eine „JA“ (bzw. „NEIN“) Prognose richtig eingetroffen sind, aus und überprüft die Güte mit der Gesamtanzahl der „JA“ (bzw. „NEIN“) Prognosen.

- **False Alarm Ratio:**

$$\frac{b}{a + b} \quad (6.9)$$

Hier geht es um das Verhältnis zwischen den so genannten *False Alarms* und allen „JA“ Vorhersagen. Idealerweise sollte nie falsch gewarnt werden und daher ist die perfekte Prognose 0. Generell liegen die Werte zwischen 0 und 1, wobei das *False Alarm Ratio* negativ orientiert ist. Wobei an dieser Stelle zu bemerken ist, dass man zwischen *False Alarm Ratio* und der *False Alarm Rate* (6.5) unterscheiden muss.

- **BIAS:**

$$B = \frac{a+b}{a+c} \quad \text{für die „JA“ Kategorie} \quad (6.10)$$

$$B = \frac{c+d}{b+d} \quad \text{für die „NEIN“ Kategorie} \quad (6.11)$$

Beim *BIAS* wird das Verhältnis zwischen „JA“ („NEIN“) Vorhersage und „JA“ („NEIN“) Beobachtet gebildet.

- *BIAS* = 1 ... keine Abweichung im Mittel, bedeutet aber eine nicht exakte Prognose.
- *BIAS* > 1 ... die Kategorie wurde öfter prognostiziert als beobachtet, „*over forecasting*“.
- *BIAS* < 1 ... die Kategorie wurde öfter beobachtet als vorhergesagt, „*under forecasting*“.

- **Critical Success Index:**

$$CSI = \frac{a}{a+b+c} \quad (6.12)$$

Der *CSI*, der auch dem *Threat Score* (TS) entspricht, ist eine Alternative zu dem *Proportion Correct* und bewegt sich ebenso zwischen 0 und 1, wobei 1 die perfekte Prognose ist. Die richtigen „JA“ Vorhersagen werden zu der Summe der richtigen „JA“ Prognosen, der *false Alarms* (Nebel vorhergesagt, aber nicht beobachtet) und *missed Events* (Nebel nicht vorhergesagt, aber beobachtet) gegenübergestellt. Daher ist der *Critical Success Index* ein gutes Maß für Extremereignisse und in dem Bereich auch wesentlich aussagekräftiger als der *PC*. Der *CSI* wird oft zur Verifikation von Wetterwarnungen verwendet.

- **Probability of Detection:**

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad \text{für die „JA“ Kategorie} \quad (6.13)$$

$$POD = \frac{d}{b+d} \quad \text{für die „NEIN“ Kategorie} \quad (6.14)$$

Bei dem *Probability of Detection* geht es um die Fragestellung wie gut die „JA“ („NEIN“) Vorhersage prognostiziert wurde beziehungsweise wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, das Ereignis richtig angekündigt zu haben. Daher orientiert man sich an den „JA“ („NEIN“) Beobachtungen. Der *POD* für die „JA“ Kategorie kann auch mit der *Hitrate* (6.4) gleichgesetzt werden. Die Werte bewegen sich zwischen 0 und 1, wobei der *POD* positiv orientiert ist (daher nimmt die perfekte Prognose den Wert 1 an). Weiters ist es sehr empfehlenswert bei der Auswertung von Prognosen, den *POD* dem *FAR* (*False Alarm Rate*) gegenüberzustellen.

- **True Skill Statistic:**

$$TSS = \frac{ad - bc}{(a + c)(b + d)} \quad (6.15)$$

Der *True Skill Statistic*, der in der Literatur auch noch unter einigen anderen Namen (beispielsweise *Peirce Skill Score*) bekannt ist, bewegt sich zwischen -1 und 1. Die *Hit Rate* (6.4) und die *False Alarm Rate* (6.5) werden einander gegenübergestellt, so kann auch  $TSS = H - F$  geschrieben werden. Dabei wird untersucht, ob die Prognose einer zufälligen Vorhersage (Klimatologie) überlegen ist. Daher ist *TSS* bei einer perfekten Prognose gleich 1 ( $H=1, F=0$ ). Entspricht die Prognose einer zufälligen, so ist das Ergebnis für *TSS* gleich 0 ( $H=F$ ), im schlechtesten Fall wäre der resultierende Wert -1.

Der *TSS* ist auch für seltene Ereignisse geeignet. Würde man immer „NEIN“ vorhersagen, so wäre das Resultat 0. Er reagiert sehr sensibel auf richtige „JA“ und „NEIN“ Vorhersagen.

## 6.2 Die Analyse des Nebels

Zur Überprüfung statistischer Verfahren ist es notwendig, unabhängige Datensätze heranzuziehen. Dies wird im Weiteren gemacht, um die Ergebnisse der logistischen Regression zu verifizieren.

Zur Berechnung der logistischen Regression werden die METAR Daten der Jahre 1990 bis 2004 einbezogen. Um für die Verifikation vergleichbar, aber dennoch unabhängige Daten zu erhalten, werden die METAR Daten von 2005, 2006 und 2007 verwendet.

Die Maße werden für diese drei Jahre separat, beziehungsweise über alle drei Jahre zusammengefasst berechnet. Zusätzlich wird noch eine Hauptsaison des Nebels, welche die Monate Oktober, November, Dezember und Jänner umfasst, eingeführt.

Für die Verifikation wird die in Kapitel 5 angeführte Regressionsgleichung für die Vorhersage von Nebelwahrscheinlichkeiten mit fünf Parametern, Spread ( $T-Td$ ), Temperatur ( $T$ ), Bedeckung ( $N_{Score}$ ), Windgeschwindigkeit ( $V$ ) und Windrichtung ( $dd$ ), verwendet:

$$P = \frac{1}{1 + \exp(-(-0,87 - 1,44 * (T - Td) - 0,04 * T + 0,38 * N_{Score} - 0,16 * V - 0,39 * dd))} \quad (6.16)$$

Dabei werden die Bedeckung und die Windrichtung in der linearisierten Form (siehe Kapitel 5) verwendet.

### 6.2.1 Brier Score

Alle berechneten *Brier Score* Werte (vgl. Tabelle 6.2) überschreiten die 0,1 Marke nicht und sprechen somit für eine gute Prognose. Bei der Gegenüberstellung der Resultate des gesamten Jahres mit denen über die Saison kann man feststellen, dass tendenziell in den Saisonmonaten ein schlechteres Ergebnis erzielt wird.

Jahr	BS	BS-Saison
2005	0,035	0,064
2006	0,043	0,081
2007	0,029	0,054
2005 - 2007	0,036	0,067

**Tabelle 6.2 Berechneter Brier Score**

Um den wahren Wert einer Prognose zu beurteilen, ist es sinnvoll, dies mit einer vergleichbaren Vorhersage zu beurteilen. In dem Fall wird dies unter Verwendung des *Brier Skill Scores* gemacht. Als so genannte Referenzprognose wird eine aus den Jahren 1990 bis 2004 berechnete klimatologische Nebelwahrscheinlichkeit (Tabelle 6.3) herangezogen.

Jän.	Feb.	März	Apr.	Mai	Juni	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
8,36%	3,77%	1,78%	0,78%	0,46%	0,20%	0,19%	0,36%	1,38%	6,47%	5,63%	6,97%

**Tabelle 6.3 Klimatologische Nebelwahrscheinlichkeit**, berechnet aus den Jahren 1990 bis 2004

Der *Brier Skill Score* wird ebenfalls für das ganze Jahr, als auch für die Hauptsaison berechnet (siehe Tabelle 6.4).

Jahr	BSS	BSS-Saison
2005	-0,547	-0,428
2006	-0,260	-0,091
2007	-1,288	-1,409
2005 - 2007	-0,542	-0,407

**Tabelle 6.4 Berechneter Brier Skill Score**

Der Wert des *Skill Scores* gibt wieder, ob mit der Prognose gegenüber der Referenzprognose eine Verbesserung erzielt wird. Man kann den *Skill Score* auch als prozentuelle Steigerung gegenüber der Referenzprognose interpretieren. In diesem Fall bewegen sich alle Ergebnisse des *Brier Skill Scores* im negativen Bereich. So kann man sagen, dass mit der logistischen Regression gegenüber einer klimatologischen Prognose keine

Verbesserung erzielt wurde. Zu beachten ist allerdings, dass die klimatologischen Wahrscheinlichkeiten relativ gering sind. Das ist der Grund für die schlechten Resultate beim *Skill Score*.

Um diese Ergebnisse zu relativieren werden in Tabelle 6.5 die berechneten Werte des *Brier Scores* und des *Brier Skill Scores* bei einer Nebelbeobachtung angeführt.

Jahr	BS	BSS
2005	0,260	0,904
2006	0,197	0,885
2007	0,314	0,906
2005 - 2007	0,237	0,895

**Tabelle 6.5 Berechneter Brier Score und Brier Skill Score nur für Nebelbeobachtungen**

In dem Fall sind zwar die Ergebnisse des *Brier Scores* in dem Bereich von 0,2 bis 0,3 und damit etwas höher, als in der vorhergehenden Berechnung. Diese lassen sich durch die logistische Regression erklären, da für einen *Brier Score* nahe 0 Wahrscheinlichkeiten nahe der 100%

prognostiziert werden müssen. Mit dieser Regressionsgleichung werden jedoch nur selten Wahrscheinlichkeiten über 90% berechnet.

Aber der signifikante Unterschied zeichnet sich bei dem *Brier Skill Score* ab. Während das Resultat über alle Vorhersagen und Beobachtungen ist, dass man mit der Klimatologie bessere Prognosen erzielt werden, ist nun das genaue Gegenteil der Fall. Im Schnitt erlangt man mit der logistischen Regression gegenüber einer klimatologischen Vorhersage eine Steigerung von rund 90%.

Dies ist ein deutliches Zeichen dafür, dass in der ersten Berechnung die Klimatologie als Vorhersagemethode lediglich durch die geringen Wahrscheinlichkeiten scheinbar bessere Resultate ergibt.

Dies ist ein deutliches Zeichen dafür, dass in der ersten Berechnung die Klimatologie als Vorhersagemethode lediglich durch die geringen Wahrscheinlichkeiten scheinbar bessere Resultate ergibt.

## 6.2.2 Reliability Diagram

In beiden Reliability Diagrammen (vgl. Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3) werden jeweils die Jahre 2005, 2006 und 2007 einzeln, sowie ein Mittel über alle drei Jahre eingetragen.

Alle Kurven, über das ganze Jahr sowie bei den Saisonmonaten, liegen deutlich unter der Diagonalen. Dies ist ein Indikator für „*Overforecasting*“. Der Abfall der Kurve bei über 90% Wahrscheinlichkeit lässt sich darauf zurückführen, dass eine solch hohe Wahrscheinlichkeit von der logistischen Regression nur selten errechnet wird.

Wird sie dennoch vorhergesagt, so tritt dann oft kein Nebel auf. Beispielsweise wurde 2005 in einem einzigen Fall eine Wahrscheinlichkeit von über 90% prognostiziert, wobei zu diesem Zeitpunkt dann kein Nebel beobachtet wurde (allerdings ist gefrierender Dunst mit einer Sichtweite von 2800m gemeldet worden).

Im Bereich von 90% kommt es zu einem Peak, da hier in rund 50% der Fälle auch tatsächlich Nebel observiert wurde.

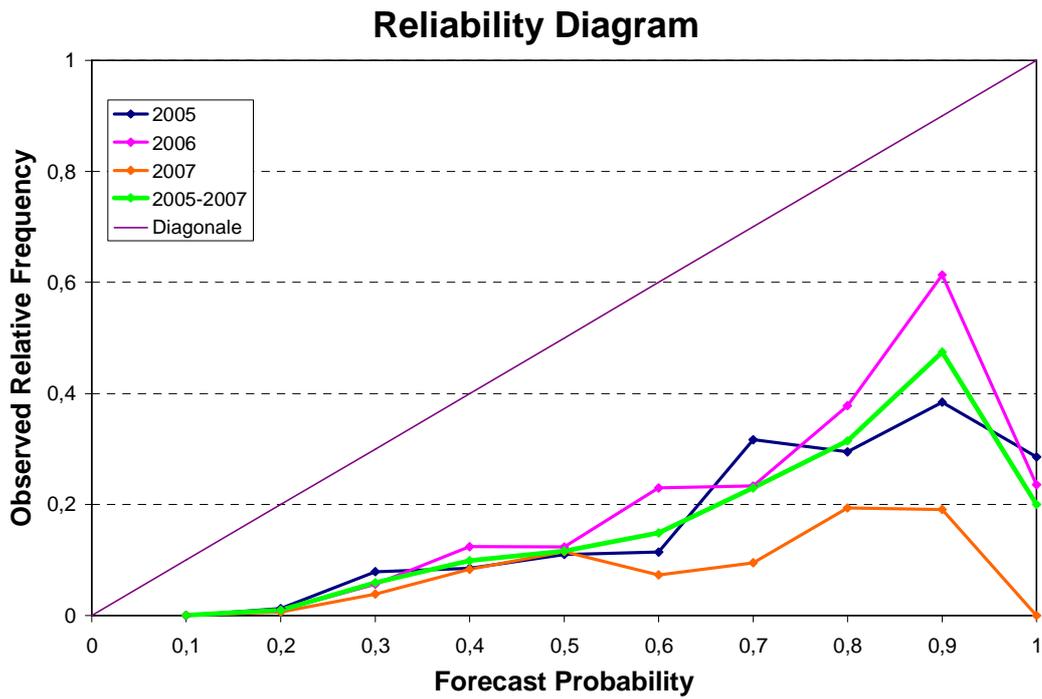


Abbildung 6-2 Reliability Diagram für alle Monate für Nebel aus den Jahren 2005 bis 2007

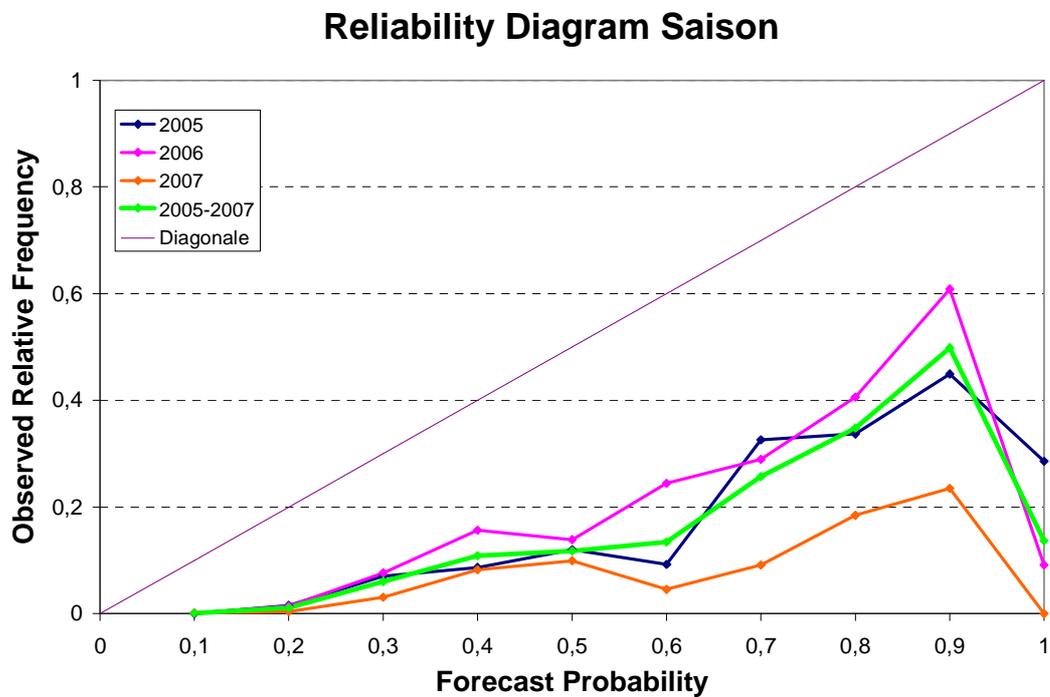


Abbildung 6-3 Reliability Diagram nur für die Saisonmonate für Nebel aus den Jahren 2005 bis 2007

### 6.2.3 ROC - Kurve

Die ROC – Kurve, welche wiederum für das gesamte Jahr (vgl. Abbildung 6-4) und für das Saisonmonate (vgl. Abbildung 6-5) berechnet wird, liefert ein gutes Ergebnis, da alle Kurven sehr steil nach 1 konvergieren und somit das Integral eine große Fläche unter der Kurve bildet. Würde es sich hierbei um eine perfekte Prognose handeln, betrüge der Wert der Fläche 1. Im Mittel ergibt sich über die drei Jahre eine Fläche von 0,95 beziehungsweise über die Saisonmonate von 0,92. Aufgrund der Gegebenheit, dass die *Hit Rate* relativ hoch ist, da diese lediglich aus den Beobachtungen gebildet wird (bei einer Nebelbeobachtung wurde Nebel häufiger vorhergesagt als nicht), dürfen diese Werte nicht missinterpretiert, in diesem Falle überschätzt, werden. Bei den Nebelfällen umfasst die Kategorie der nicht vorhergesagten und nicht beobachteten Ereignisse mit Abstand die meisten Fälle (da Nebel ein Extremereignis ist), wodurch die *False Alarm Rate* empfindlich gedämpft wird.

Das Reliability Diagram zeigt, dass die Prognose nicht so perfekt ausfällt, wie die Ergebnisse der ROC – Kurve dies illustrieren.

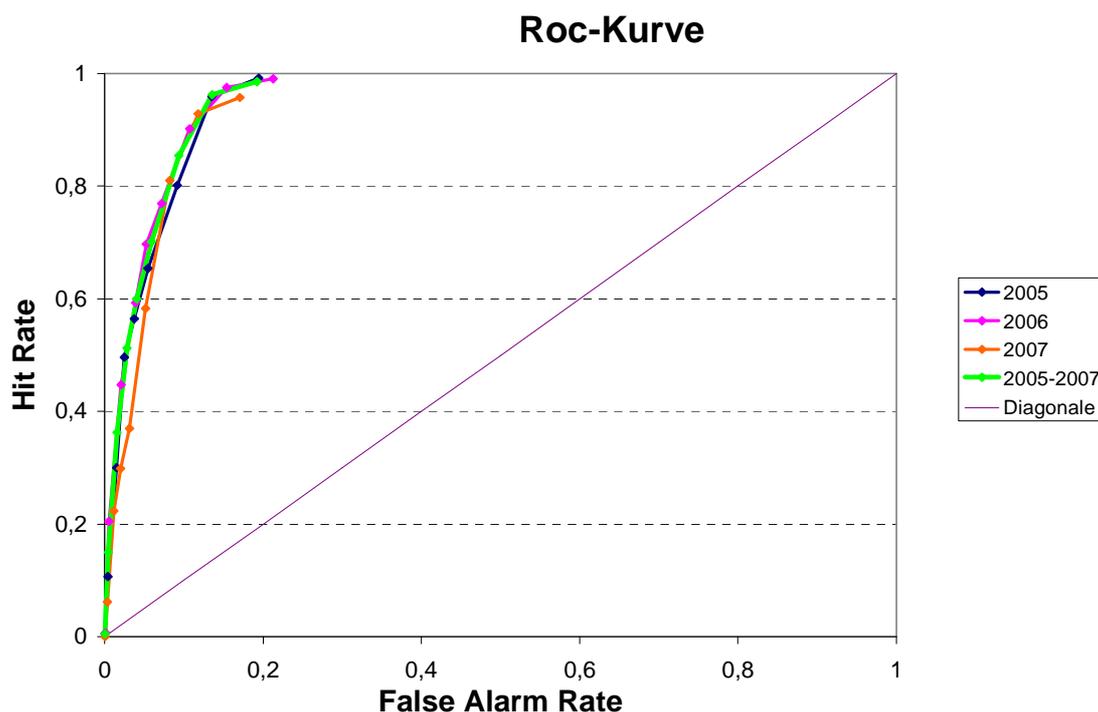


Abbildung 6-4 Relative Operating Characteristic Kurve über alle Monate für Nebel für die Jahre 2005 bis 2007. Die Fläche unter der Kurve ergibt 0,95

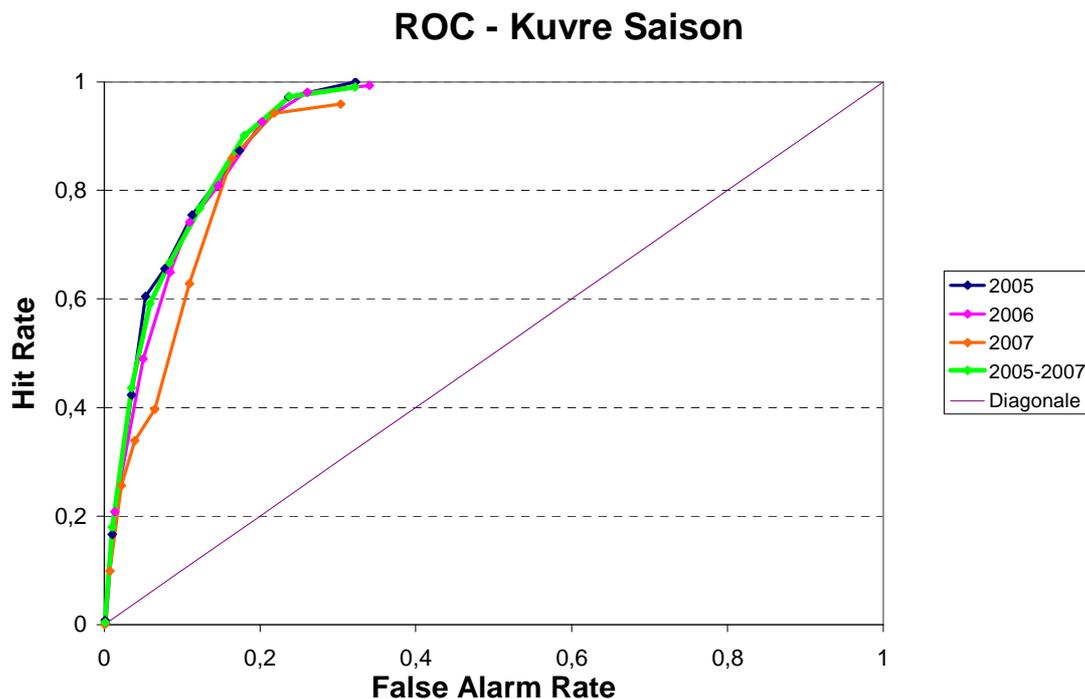


Abbildung 6-5 Relative Operating Characteristic Kurve über die Saisonmonate für Nebel für die Jahre 2005 bis 2007. Die Fläche unter der Kurve ergibt 0,92

### 6.2.4 Andere Verifikationsmaße

In diesem Abschnitt werden die in Kapitel 6.1.4 angeführten Verifikationsmaße verwendet, die sich aus Kontingenztabelle berechnen lassen.

Um die Kontingenztabelle zu erstellen, werden Schwellwerte in 10% Abständen eingeführt. Weiters werden in den angeführten Tabellen (Tabelle 6.6 und Tabelle 6.7) nur Werte mit den Schwellwerten 50% und 70% eingetragen. Prinzipiell gibt es verschiedene Möglichkeiten zu diesen aussagekräftigen Grenzwerten zu gelangen. Die zwei gebräuchlichsten Methoden sind das klimatologische Mittel (alle Wahrscheinlichkeiten, die über dem Mittel liegen, werden als „JA“ Vorhersagen betrachtet), beziehungsweise die 50% Marke. Andere Möglichkeiten sind entweder den *Critical Success Index (Threat Score)* oder den *Bias* als Schwellwert heranzuziehen. Im Fall des *Bias* werden alle Wahrscheinlichkeiten, die über dem Wert von 1 liegen als „JA“ Prognosen betrachtet.

Nachdem beim *Bias* in etwa bei 65% der Wert 1 erreicht wird, fiel die Wahl auf den Grenzwert von 70%. Zum Vergleich wird die 50% Marke herangezogen. Zusätzlich ist das klimatologische Mittel als Schwellwert angeführt, wobei zu beachten ist, dass hier für jeden Monat die entsprechende klimatologische Wahrscheinlichkeit (Tabelle 6.3) herangezogen wird.

In Tabelle 6.6 beziehungsweise Tabelle 6.7 sind die Ergebnisse der Verifikationsmaße aufgelistet. In der letzten Spalte ist jeweils der Wert angeführt, der für eine perfekte Prognose spricht. Die Resultate, die nahezu an eine perfekte Prognose herankommen, sind dabei gelbbraun unterlegt.

Gütemaße	70%	50%	Klima	
PC	0,969	0,951	0,688	1
PAy	0,360	0,267	0,071	1
PAn	0,984	0,990	0,999	1
FARatio	0,640	0,733	0,928	0
Bias (y)	1,008	2,247	14,001	
Bias (n)	1,000	0,969	0,681	
CSI	0,221	0,227	0,071	1
PODy	0,363	0,600	0,997	1
PODn	0,984	0,960	0,681	1
TSS	0,347	0,560	0,678	1

Gütemaße	70%	50%	Klima	
PC	0,939	0,904	0,654	1
PAy	0,391	0,292	0,124	1
PAn	0,971	0,981	0,999	1
FARatio	0,609	0,708	0,876	0
Bias (y)	1,116	2,281	8,000	
Bias (n)	0,994	0,934	0,637	
CSI	0,260	0,255	0,124	1
PODy	0,436	0,667	0,995	1
PODn	0,965	0,916	0,637	1
TSS	0,401	0,583	0,632	1

**Tabelle 6.7 Verifikationsmaße** über die Jahre 2005 bis 2007 für alle Monate

**Tabelle 6.6 Verifikationsmaße** über die Jahre 2005 bis 2007 über die Saisonmonate

- **Proportion Correct:**

Der *PC* liefert sowohl in der Kategorie 50% als auch 70% Werte, welche höher als 0,9 sind, und somit nahe an einer perfekten Prognose sind. Lediglich bei der Klimatologie ist der Wert mit 0,688 etwas niedriger, dennoch kann er dem signifikanten Bereich zugeordnet werden. Somit spricht der *Proportion Correct* für ein gutes Prognoseverfahren. Jedoch kann, wie schon im Abschnitt 6.1.4 besprochen, durch ein nicht prognostizieren von Extremereignissen (wie hier Nebel) ein besseres Ergebnis des *PC* erzeugt werden. Die durch die logistische Regression berechneten Wahrscheinlichkeiten sind in einem eher geringen Bereich. Damit geht die Tendenz eher in die Richtung, dass kein Nebel vorhergesagt wird. Die Resultate des *PCs* fallen somit zu positiv aus und müssen in weiterer Folge relativiert werden.

- **Post Agreement:**

Das *Post Agreement* kann sowohl für die Kategorie „JA“ als auch „NEIN“ berechnet werden. Vergleicht man hier die Ergebnisse, so zeigt sich wieder deutlich, dass das Ereignis „kein Nebel“ gut vorhergesagt werden kann, während bei einer Nebelvorhersage der Wert sich im unteren und somit deutlich schlechteren Bereich bewegt. Die Kategorie „Klima“ liefert bei den „JA“ - Vorhersagen schlechtere Resultate, da hier aufgrund des niedrigeren Schwellwertes deutlich mehr *False Alarms* prognostiziert werden. Für die „NEIN“ - Prognosen wird hingegen nahe zu perfekt vorhergesagt.

- **False Alarm Ratio:**

Bei den Ergebnissen des *False Alarm Ratio* zeigt sich, dass trotz der niedrigen vorgesagten Wahrscheinlichkeiten auch oft falsch gewarnt wird. In den meisten Fällen wird häufiger falsch als richtig gewarnt (bei 70% in 578 von 949, bei 50% in 1372 von 1939 und bei Klima in 5954 von 6800 „JA“ Vorhersagen wird falsch gewarnt). Je höher der Schwellwert gesetzt wird, desto bessere Resultate können erzielt werden.

Wenn das klimatologische Mittel als Schwellwert herangezogen wird, treten generell deutlich mehr *False Alarms* im Verhältnis zu den richtig prognostizierten Ereignissen auf.

- **BIAS:**

Bei dem *Bias* wird zwischen den „JA“ und „NEIN“ Vorhersagen unterschieden. Sieht man sich die „JA“ Prognosen an, so zeigt sich, sowohl für alle Monate als auch für die Saisonmonate, dass bei dem Schwellwert von 70%, Nebel fast gleich oft beobachtet wie prognostiziert wurde und bei dem Schwellwert von 50%, Nebel fast doppelt so oft prognostiziert als beobachtet wurde.

Im Vergleich dazu bewegen sich die Werte bei den „NEIN“ Vorhersagen immer knapp um 1, was für eine kleine Differenzen zwischen der Anzahl der Prognosen und der Beobachtungen spricht. Allerdings ist bei dem *Bias* immer zu beachten, dass nichts Konkretes über die Güte einer Prognose aussagt wird.

- **Critical Success Index:**

Der *Critical Success Index*, oder auch *Threat Score*, liefert die schlechtesten Ergebnisse von allen Gütemaßen. Damit bestätigt sich, dass verhältnismäßig oft *missed Events*, beziehungsweise vor allem aber *false Alarms*, vorhergesagt werden.

- **Probability of Detection:**

Dieses Gütemaß wird sowohl für die „JA“- , als auch für die „NEIN“ - Kategorie berechnet. Die „NEIN“ Vorhersagen werden hierbei ziemlich gut getroffen. In jedem betrachteten Fall liegen die Werte über 0,9, was sehr nah an die perfekte Prognose herankommt. Jedoch liegen bei den „JA“ - Prognosen die Werte in einem sehr niedrigen Bereich, wobei für die Saisonmonate tendenziell bessere Ergebnisse erzielt werden. Bei dem Schwellwert 50% werden Werte über 0,5 berechnet. Das bedeutet soviel wie, dass in über 50% der Fälle einer Nebelbeobachtung auch Nebel vorhergesagt wurde. In dem Fall schneidet der Schwellwert „Klima“ deutlich besser ab, da es relativ wenige *missed Events* gibt. Es ist also bei fast 100% der Nebelbeobachtungen auch tatsächlich Nebel prognostiziert worden.

- **True Skill Statistic:**

Der *TSS* liegt in jedem Fall deutlich über 0. Das bedeutet, dass mit der logistischen Regression bessere Ergebnisse erzielt werden, als wenn mit einer reinen Zufallsprognose gearbeitet werden würde. Die 70% - Grenze liefert die schlechtesten und „Klima“ die besten Ergebnisse. Das liegt daran, dass der *TSS* auf *missed Events* sensibel, aber nicht auf *False Alarms* reagiert.

### 6.3 Die Analyse des Hochnebels

Wie bereits für den Nebel, wird auch das Endergebnis - der Regressionsanalyse für den Hochnebel verifiziert. Die resultierende Regressionsgleichung lautet:

$$P = \frac{1}{1 + \exp(-(-0,73 - 1,38 * (T - T_d) - 2,45 * MM_{lin.} - 0,71 * dd_{lin.} + 0,02 * T)))} \quad (6.17)$$

Als unabhängige Daten wurde wieder METAR – Meldungen des Flughafens Wien – Schwechat aus den Jahren 2005 bis 2007 verwendet.

Bereits bei der Berechnung der „Vorhersagen“ hat sich gezeigt, dass zu keinem Zeitpunkt der Jahre 2005 und 2007 eine Wahrscheinlichkeit über 50% und des Jahres 2006 eine Wahrscheinlichkeit über 60% prognostiziert wird. Daher wird die Verifikation des Hochnebels in einer verkürzten Form, ohne Auswertung der Saisonen und nur mit ausgewählten Verifikationsmaßen, dargestellt.

#### 6.3.1 Brier Score

In Tabelle 6.8 sind für alle Jahre die berechneten *Brier Scores*, sowie die *Briers Skill Scores* angeführt. Die für den *Skill Score* verwendeten klimatologischen Wahrscheinlichkeiten sind

Jahr	BS	BSS
2005	0,023	0,198
2006	0,027	0,125
2007	0,021	0,173
2005 - 2007	0,024	0,164

**Tabelle 6.8 Berechneter Brier Score sowie der entsprechende Brier Skill Score**

der Tabelle 6.9 zu entnehmen. Für den Hochnebel, wie auch schon bei dem Nebel, liegt der BS nahe 0, was einer guten Prognose entspricht. Anders als beim Nebel deuten die Resultate des BSS auf eine Steigerung der Vorhersage mit der logistischen Regression gegenüber der Referenzprognose (Klimatologie) um fast 20%. Der Grund dafür ist, dass sich die mit der logistischen Regression erzeugten Wahrscheinlichkeiten für den Hochnebel

in einem geringen Bereich bewegen. So werden für den Hochnebel, im Gegensatz zum Nebel, mit diesem Verifikationsmaß bessere Ergebnisse erreicht.

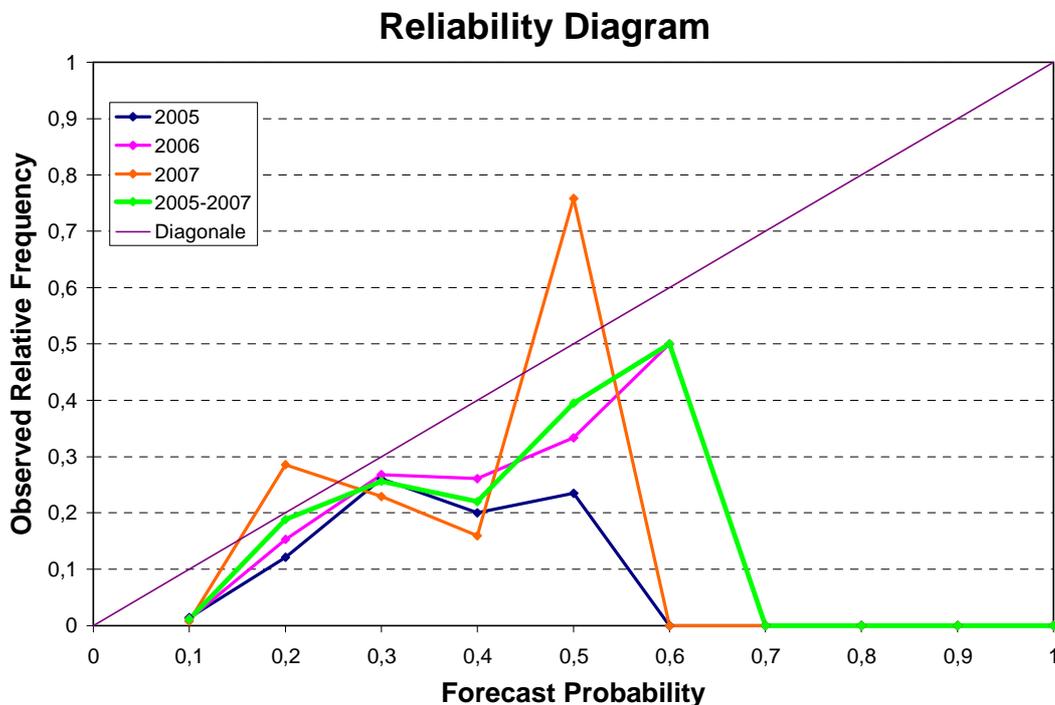
Jän.	Feb.	März	Apr.	Mai	Juni	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
7,68%	1,76%	1,46%	0,93%	0,31%	0,34%	0,14%	0,18%	0,68%	4,04%	7,94%	8,97%

**Tabelle 6.9 Klimatologische Hochnebelwahrscheinlichkeit.** Berechnet aus den Jahren 1990 bis 2004.

Im Unterschied zu dem Bodennebel, wird bei Hochnebel bei einer Berechnung des Brier Scores und des Brier Skill Score für ausschließlich Hochnebelbeobachtungen keine markante Verbesserung der Resultate erzielt. Mit der logistischen Regression wird gegenüber einer klimatologischen Prognose eine Steigerung von 20% erreicht.

### 6.3.2 Reliability Diagram

Das Reliability Diagram über alle Monate für den Hochnebel ist in Abbildung 6-6 dargestellt. Wird diese Graphik mit der Abbildung 6-2 (Reliability Diagram für Nebel) verglichen, so zeigt sich bereits auf den ersten Blick ein markanter Unterschied. Während die Kurven bei Nebel sehr flach bleiben, steigen sie bei Hochnebel stark an, beziehungsweise bewegen sich nahe der Diagonalen. Dies deutet auf eine gute Prognose hin. Allerdings fallen die Kurven in dem Forecast Probability Bereich von 0,6 deutlich ab. Der Grund dafür ist, dass mit der logistischen Regression keine höheren Wahrscheinlichkeiten berechnet werden.



**Abbildung 6-6 Reliability Diagram für Hochnebel für alle Monate aus den Jahren 1990 bis 2005**

### 6.3.3 ROC – Kurve

Da für den Hochnebel keine hohen Wahrscheinlichkeiten prognostiziert werden streben die Kurven in Abbildung 6-7 zwar gegen 1, erreichen diesen Wert aber nicht.

Der generelle Verlauf ist dem des Nebels sehr ähnlich. Durch die hohen Werte der Hit Rate und die geringen der False Alarm Rate kann auf ein gut Prognose geschlossen werden. Aber hier ist zu beachten, dass lediglich im Bereich des geringsten Schwellwertes (0% bis 10%) bei einer Hochnebelbeobachtung auch öfters das Eintreten vorhergesagt wurde, als das Nicht – Eintreten von Hochnebel.

Die geringen Wahrscheinlichkeiten wirken sich auch empfindlich auf die False Alarms aus. Hochnebel wird im Allgemeinen kaum prognostiziert und tritt auch relativ selten auf, daher wird durch die hohe Anzahl an Prognosen, die der Kategorie  $d$  (Nicht – Eintreten prognostiziert und beobachtet) zuzuweisen sind, eine entsprechend geringe False Alarm Rate berechnet.

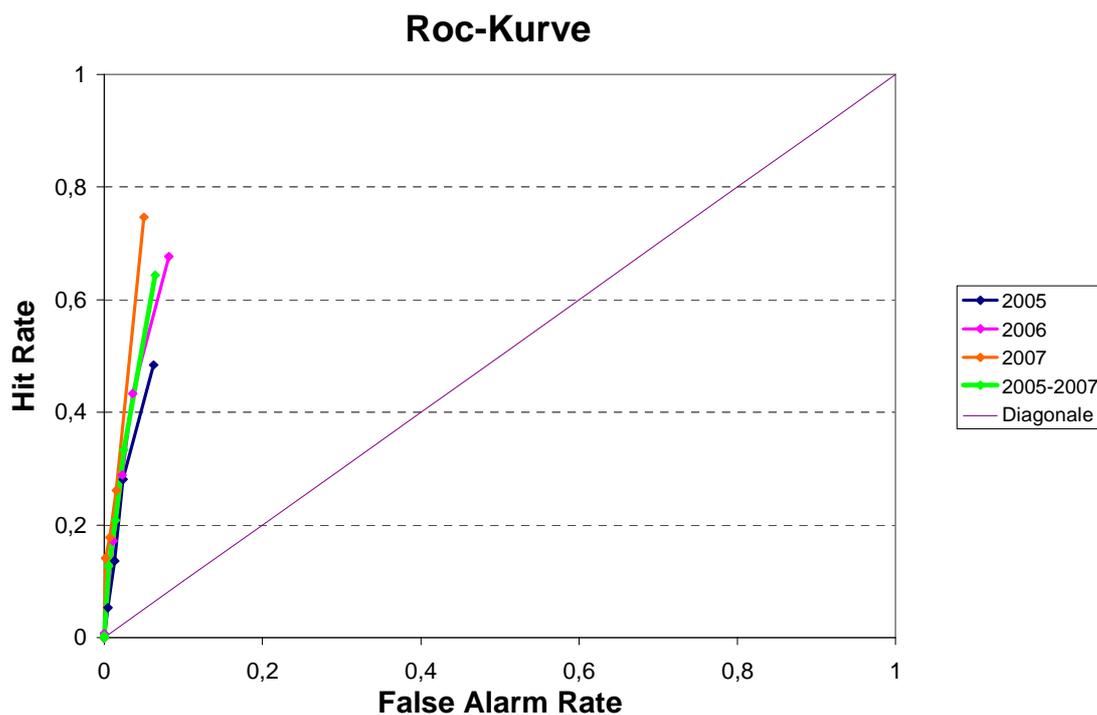


Abbildung 6-7 Relative Operating Characteristic Kurve für Hochnebel über alle Monate für die Jahre 2005 bis 2007

## 7 Die Zukunft der Nebelprognose

Für jeden Verkehrsteilnehmer ist jede Sichtreduktion eine Gefährdung. So ist es auch in der Luftfahrt. Eine mögliche Nebellage stellt für jeden Meteorologen im operationellen Dienst eine Herausforderung dar, speziell wenn diese zeitlich, örtlich sowie von seiner „Intensität“ so genau wie möglich prognostiziert werden soll. Die Grundvoraussetzungen zur Nebelbildung sind bereits bekannt, dennoch erhält man aus diesen oft nicht ausreichend Information, um eine „perfekte Prognose“ abzugeben. Immer wieder zeigt sich, dass sowohl die Erfahrung als auch die Ortskenntnis das „*non plus ultra*“ einer guten Vorhersage sind. Auch mit numerischen Modellen wird die Problematik der Nebelprognose noch nicht befriedigend gelöst.

Um diese Thematik statistisch zu untersuchen, beziehungsweise deren Problematik zu erforschen, wurde in dieser Arbeit - nach einer Untersuchung der Wettermeldungen des Flughafens Wien – Schwechat aus den Jahren 1990 bis 2004 - als statistische Methode die logistische Regression gewählt. Der Vorteil dieser Methodik liegt darin, dass sie Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Nebel liefert. Speziell für den Nebel können mit dieser Arbeitsweise gute Erfolge verbucht werden (siehe dazu Kapitel 6). Dennoch reichen die Ergebnisse der logistischen Regressionsanalyse noch nicht an eine „perfekt Prognose“ heran. Auch für die Hochnebelprognose wurde die logistische Regression verwendet, allerdings wurden hierbei deutlich schlechtere Ergebnisse als für den Bodennebel erzielt. Ein Grund dafür ist wohl, dass für den Hochnebel keine reine meteorologische Definition herangezogen wurde, sondern eine aus der Luftfahrt abgeleitete (siehe Kapitel 3, die Definition wurde mit Hilfe der LVP erzeugt). Für diese Art der Definition spricht jedoch der Luftfahrtbezug dieser Arbeit. Wenn man einzelne Fälle genauer betrachtet und differenzierter behandelt, könnten in diesem Sektor noch weitere Verbesserungen erzielt werden.

Aus prognostizierten meteorologischen Parametern (beispielsweise auch aus numerischen Modellen) können unter Verwendung der logistischen Regression Nebelwahrscheinlichkeiten für einen Zeitpunkt berechnet werden. Was bei dieser Verfahrensweise generell außer Acht gelassen wurde, ist einerseits der zeitliche Verlauf und andererseits eine Unterteilung in die einzelnen Nebeltypen. Untersucht man die Zeitpunkte kurz vor und nach der Nebelbildung bzw. –auflösung genauer und versucht diese in die Prognose noch mit einzubinden, wirkt sich dies auf die Prognose positiv aus.

Für den Nebel wurde in die hier entwickelte Regression weder Tages- noch Jahreszeit miteinbezogen, da diese keine wesentliche Verbesserung brachte. Dennoch erweisen sich in

der Praxis beide Größen als entscheidend. Daher gäbe es die weitere Möglichkeit, eine Regressionsgleichung für jede Jahreszeit zu berechnen.

Gerade für den Hochnebel würde sich eine wesentliche Verbesserung ergeben, wenn die vertikale Schichtung der Atmosphäre miteinbezogen würde. Dafür gibt es allerdings nicht viele Möglichkeiten. Eine davon wäre die Implementierung von täglichen Radiosondenaufstiegen, welche allerdings nur das aktuelle Bild dieses Zeitpunktes widerspiegeln würde. Für den Hochnebel, beziehungsweise den so genannten „Low Stratus“, wäre es auch hilfreich, Fernerkundungsmethoden (Remote Sensing) heranzuziehen.

Diese Arbeit war im Speziellen auf die Bedürfnisse des Flughafens Wien – Schwechat ausgerichtet, denkbar wäre auch eine Anwendung auf andere Gebiete, seien es andere Flugplätze oder auch beispielsweise Straßen. Für jede statistische Auswertung ist ein hinreichend langer Beobachtungszeitraum notwendig, und so ist es auch in diesem Fall. Um das Verfahren der logistischen Regression auf andere Gebiete auszuweiten, muss die Voraussetzung einer genügend langen Zeitreihe von klimatologischen Beobachtungen erfüllt sein.

Die logistische Regression ist eine Methode, mit der gute Erfolge erzielt werden können. Dennoch wäre es für die Zukunft von Interesse, auch andere Verfahren, wie beispielsweise neuronale Netze, die auch zum Teil aufwendiger und komplexer sind, für die Nebelprognose heran zu ziehen.

Der Nebel ist ein Phänomen mit vielen Gefahrenelementen, aber auch aus rein wissenschaftlicher Sicht hoch interessant und daher auch Mittelpunkt einer Fülle an bereits existierenden Forschungsarbeiten. Trotzdem bietet er noch unzählige Möglichkeiten für weitere Studien und Forschungsfragen, um die perfekte Nebelprognose zu erlangen.

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1-1</b>	Karte von Wien und des südlichen Wiener Beckens. Der Flughafen Wien Schwechat ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Quelle: Ed. Hölzel, Hölzel - Weltatlas, 1995, S. 9.....	1
<b>Abbildung 2-1</b>	Sättigungsdampfdruckkurve (durch-gezogen über Wasser, gestrichelt über Eis)Quelle: Erde und Planeten, Bergmann Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 7 [1].....	8
<b>Abbildung 2-2</b>	Strahlungsnebel, der sich gerade auflöst. Quelle: Walch (1989).....	10
<b>Abbildung 2-3</b>	Seenebel in der Arktis. Quelle: Walch (1989).....	12
<b>Abbildung 2-4</b>	„Nebelsuppe“, seichter Hochnebel Quelle: Walch (1989).....	13
<b>Abbildung 4-1</b>	Verteilung der Windrichtung gegen die Windgeschwindigkeit im Fall von Nebel in den Wintermonaten. ....	24
<b>Abbildung 4-2</b>	Prozentuelle Verteilung der Windgeschwindigkeit pro Windrichtung im Fall von Nebel. ....	26
<b>Abbildung 4-3</b>	Prozentuelle Verteilung der Windrichtung bei Nebel in den Jahreszeiten. 100% entspricht allen Meldungen pro Jahreszeit und Windrichtung. ....	28
<b>Abbildung 4-4</b>	Verteilung der Temperatur pro Jahreszeit bei Nebel. ....	30
<b>Abbildung 4-5</b>	Die prozentuelle Verteilung der Uhrzeit pro Jahreszeit. Die Uhrzeit ist in UTC angegeben. ....	32
<b>Abbildung 4-6</b>	Prozentuelle Verteilung der Strömungslagen an Nebeltagen. Verteilung über die Jahre 1990 bis 2003. ....	34
<b>Abbildung 4-7</b>	Verteilung der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit bei Hochnebel. Windrichtung ist eingeteilt in 12 Klassen und eine Klasse „Variabel“, die Windgeschwindigkeit ist unterteilt in 3 Intervalle 1-3kt, 4-6kt und alles was über 6kt ist. 100% ist jeweils die Summe über jede Windrichtung. ....	38
<b>Abbildung 4-8</b>	Prozentuelle Verteilung der Windrichtung pro Jahreszeit. 100% sind alle Meldungen einer Windrichtung und Jahreszeit. ....	39
<b>Abbildung 4-9</b>	Prozentuelle Temperaturverteilung von allen Nebelfällen, Hochnebefällen und aller Temperaturwerte (Gesamt) von Schwechat. 100% ist die Summe über jede „Farbe“. ....	40
<b>Abbildung 4-10</b>	Saisonale Temperaturverteilung bei Hochnebel .....	41
<b>Abbildung 4-11</b>	Saisonale Verteilung des Hochnebels im Bezug auf die Tageszeit. 100% ist die Summe über die einzelnen Jahreszeiten. ....	43
<b>Abbildung 4-12</b>	Prozentuelle Verteilung der Strömungslagen. Verteilung über die Jahre 1990 bis 2003. Gesamt: Verteilung aller Tage; FG: Verteilung aller Nebeltage; „Hochnebel“: Verteilung aller Hochnebefälle .....	44
<b>Abbildung 5-1</b>	Beispiel einer logistischen Regression (durchgezogene Linie), zeigt die S – Form der Kurve. Dargestellt ist der Zusammenhang zwischen der	

	Minumtemperatur und dem Niederschlag Quelle: Wilks (2006) S. 204 [23] ....	48
<b>Abbildung 5-2</b>	Auswertungen der Temperatur für Nebel aus den Jahren 1990 bis 2004. ....	53
<b>Abbildung 5-3</b>	Auswertungen des Spreads für Nebel aus den Jahren 1990 bis 2004 .....	54
<b>Abbildung 5-4</b>	Auswertung der Windgeschwindigkeit für Nebel aus den Jahren 1990 bis 2004.....	55
<b>Abbildung 5-5</b>	Auswertung der linearisierten Windrichtung für Nebel von den Jahren 1990 bis 2004 .....	56
<b>Abbildung 5-6</b>	Auswertung der Bedeckung für Nebel aus den Jahren 1990 bis 2004 .....	57
<b>Abbildung 5-7</b>	Auswertungen des Jahresverlauf (der einzelnen Monate) für Nebel der Jahre 1990 bis 2004. ....	58
<b>Abbildung 5-8</b>	Auswertung der Tageszeit für Nebel von den Jahren 1990 bis 2004. ....	59
<b>Abbildung 5-9</b>	Multiple Logistische Regression für Nebel mit den Parametern Windgeschwindigkeit und Bedeckung. Auswertung der Jahr 1990 bis 2004 ....	61
<b>Abbildung 5-10</b>	Multiple logistische Regression für Nebel mit den Parametern Spread und Bedeckung. Auswertung der Jahre 1990 bis 2004 .....	62
<b>Abbildung 5-11</b>	Multiple logistische Regression für Nebel mit den Parametern Spread und Windgeschwindigkeit. Auswertung der Jahre 1990 bis 2004. ....	62
<b>Abbildung 5-12</b>	Multiple Logistische Regression für Nebel mit den Parametern Bedeckung, Spread, Windgeschwindigkeit. Auswertung der Jahre 1990 bis 2004 .....	63
<b>Abbildung 5-13</b>	Multiple Logistische Regression für Nebel mit den Parametern Spread, Temperatur, Bedeckung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Auswertung der Jahre 1990 bis 2004 .....	64
<b>Abbildung 5-14</b>	Auswertung der Temperatur für Hochnebel aus den Jahren 1990 bis 2004 .....	66
<b>Abbildung 5-15</b>	Auswertung des Spreads für Hochnebel der Jahre 1990 bis 2004 .....	67
<b>Abbildung 5-16</b>	Auswertung der Windgeschwindigkeit für Hochnebel der Jahre 1990 bis 2004 .....	68
<b>Abbildung 5-17</b>	Auswertung der Windrichtung für Hochnebel der Jahre 1990 bis 2004 .....	69
<b>Abbildung 5-18</b>	Auswertungen des Jahresverlaufs (der einzelnen Monate) für Hochnebel der Jahre 1990 bis 2004. ....	70
<b>Abbildung 5-19</b>	Auswertung von Spread und Jahresverlauf für Hochnebel aus den Jahren 1990 bis 2004 .....	71
<b>Abbildung 5-20</b>	Auswertung von Spread und Windrichtung (linearisiert) für Hochnebel aus den Jahren 1990 bis 2004 .....	72
<b>Abbildung 5-21</b>	Auswertung von Spread, Jahresverlauf und Windrichtung (linearisiert) für Hochnebel aus den Jahren 1990 bis 2004 .....	72
<b>Abbildung 5-22</b>	Auswertung von Spread, Jahresverlauf, Windrichtung und Temperatur für Hochnebel aus den Jahren 1990 bis 2004 .....	73
<b>Abbildung 6-1</b>	Beispiel einer ROC – Kurve Quelle der Daten: Wilks (2006) .....	78
<b>Abbildung 6-2</b>	Reliability Diagram für alle Monate für Nebel aus den Jahren 2005 bis 2007 ...	84
<b>Abbildung 6-3</b>	Reliability Diagram nur für die Saisonmonate für Nebel aus den Jahren 2005 bis 2007 .....	84

---

<b>Abbildung 6-4</b>	Relative Operating Characteristic Kurve über alle Monate für Nebel für die Jahre 2005 bis 2007 .....	85
<b>Abbildung 6-5</b>	Relative Operating Characteristic Kurve über die Saisonmonate für Nebel für die Jahre 2005 bis 2007 .....	86
<b>Abbildung 6-6</b>	Reliability Diagram für Hochnebel für alle Monate aus den Jahren 1990 bis 2005.....	90
<b>Abbildung 6-7</b>	Relative Operating Characteristic Kurve für Hochnebel über alle Monate für die Jahre 2005 bis 2007 .....	91

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 3.1</b>	Elemente der Wettererscheinungen eines METAR – Codes, Quelle: Jeppesen [8].....	15
<b>Tabelle 3.2</b>	Meteorologische Mindestbedingungen für Sicht- und Instrumentenflug.....	19
<b>Tabelle 3.3</b>	Einteilung der Low Visibility Kategorien beim Anflug Quelle: Jeppesen [9] .....	20
<b>Tabelle 4.1</b>	Anzahl der Nebeltage pro Monat. Mittelwert entspricht dem Mittel über die Jahre 1990 bis 2004 aller im jeweiligen Monat aufgetretener Nebeltage, MAX (MIN) entspricht der maximal (minimal) Anzahl an Tagen mit Nebelvorkommnissen im jeweiligen Monat innerhalb der 15 Jahre. ....	22
<b>Tabelle 4.2</b>	Anzahl der Meldungen mit Nebel. Mittelwert entspricht der durchschnittlichen Anzahl von Nebelmeldungen innerhalb eines bestimmten Monats über die 15 Jahre. MAX (MIN) ist die maximal (minimal) aufgetretene Anzahl an Nebelmeldungen innerhalb eines Monats. ....	23
<b>Tabelle 4.3</b>	Temperatur-Taupunkts-Differenz Prozentuelle Verteilung bei Nebel pro Jahreszeit. 100% ist die Summe über jede Jahreszeit. Tdif0 ist 0°C Differenz; Tdif1 ist 1°C Differenz; Tdif2 ist 2°C Differenz; Tdif3 ist 3°C Differenz; Tdif4 ist 4°C Differenz; Tdif5 ist 5°C Differenz; Tdif6 ist 6°C Differenz; .....	30
<b>Tabelle 4.4</b>	Prozentuelle Verteilung der Temperatur-Taupunkts-Differenz, für die Fälle in denen Nebel eingetreten ist. 100% ist jeweils die Summe, beispielsweise alle 0°C Differenzen über eine Jahreszeit. Differenzen sind ident zur Tabelle 4.3. ....	31
<b>Tabelle 4.5</b>	Saisonale Verteilung der mittleren Nebelstunden .....	35
<b>Tabelle 4.6</b>	Verteilung der mittleren Nebeltage pro Monat .....	35
<b>Tabelle 4.7</b>	Prozentuelle Verteilung von Nebelfällen (FG), von Low Visibility Procedure Kategorie 1 Fällen (LVP1), von LVP1 Fällen ohne Nebel (LVPoFG), von den im 4.3.1. als Hochnebel definierten Fällen (LVPHN) und von den Fällen, die in LVP1 fallen und auch gleichzeitig Nebelfälle sind (LVPPFG). 100% sind alle Meldungen pro Monat. ....	37
<b>Tabelle 6.1</b>	Schema einer Kontingenztafel .....	77
<b>Tabelle 6.2</b>	Berechneter Brier Score .....	82
<b>Tabelle 6.3</b>	Klimatologische Nebelwahrscheinlichkeit, berechnet aus den Jahren 1990 bis 2004 .....	82
<b>Tabelle 6.4</b>	Berechneter Brier Skill Score .....	82
<b>Tabelle 6.5</b>	Berechneter Brier Score und Brier Skill Score nur für Nebelbeobachtungen .....	83
<b>Tabelle 6.6</b>	Verifikationsmaße über die Jahre 2005 bis 2007 über die Saisonmonate .....	87
<b>Tabelle 6.7</b>	Verifikationsmaße über die Jahre 2005 bis 2007 für alle Monate .....	87
<b>Tabelle 6.8</b>	Berechneter Brier Score sowie der entsprechende Brier Skill Score .....	89
<b>Tabelle 6.9</b>	Klimatologische Hochnebelwahrscheinlichkeit. Berechnet aus den Jahren 1990 bis 2004. ....	90

## Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
BC	Schwaden
BL	Wehen
BR	Feuchter Dunst
BS	Brier Score
CSI	Critical Success Index
dd / dd <sub>lin</sub>	Windrichtung / Windrichtung linearisiert
DR	Treiben
DU	Staub
DZ	Nieseln
E	Ost
F	False Alarm Rate
FARatio	False Alarm Ratio
FG	Nebel
FL	Flight Level
ft	Fuss
FU	Rauch
FZ	gefrierend
GR	Hagel
GS	Graupel
H	Hit Rate
h / h <sub>lin</sub>	Stunden / Stunden linearisiert
HZ	Trockener Dunst
IC	Eiskristalle
ICAO	International Civil Aviation Organization
IFR	Instrumenten Flight Rules
IMC	Instrument Meteorological Conditions
km/h	Kilometer pro Stunde
kt	Knoten
L(x)	Logarithmierte Likelihood - Funktion
LVP	Low Visibility Procedure
m	Meter
m / m <sub>lin</sub>	Jahresverlauf / Jahresverlauf (Monate) linearisiert

---

m/s	Meter pro Sekunde
METAR	Meteorological Routine Report
MI	Seicht
N	Nord
N / N <sub>Score</sub>	Bedeckung / Bedeckung „linearisiert“
nm	Nautische Meilen
PA	Post Agreement
PC	Proportion Correct
PE	Eiskörnchen
POD	Probability of Detection
PR	Teilweise
RA	Regen
ROC	Relative Operating Characteristic
RVR	Runway Visual Range
S	Süd
SA	Sand
SG	Schneegrieseln
SH	Schauer
SN	Schnee
T	Temperatur
Td	Taupunkt
TS	Gewitter
TSS	True Skill Statistic
UTC	Universal Time Coordinated
V	Windgeschwindigkeit
VA	Asche
VC	In der Umgebung
VFR	Visual Flight Rules
VIS	Sichtweite
VMC	Visual Meteorological Conditions
VV	Vertical Visibility
W	West
$\Lambda(x)$	Likelihood - Funktion

## Literaturverzeichnis

- [1] Bauer, Siegfried J., Gutdeusch, Rudolf, Hantel Michael, Reuter, Heinz, Rucker, Helmut O., Siedler, Gerold, Spohn, Tilman, Steinacker, Reinhold und Zenk, Walter, *Erde und Planeten*, Bergmann Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 7, Walter de Gruyter Verlag, 2.Auflage, Berlin 2001
  
- [2] Best, Henning, *Einführung in die Logistische Regression*, 2002 <http://www.metaanalyse.de/material/re020610.pdf> (2008)
  
- [3] Bezold, Wolfgang, *Eine objektive Vorhersagemethode für geringe Sichtweiten auf statistischen Grundlagen*, Meteorologische Rundschau, 12.Jahrgang, Heft 3, München 1959, S.100-103
  
- [4] Biermair, Nicola, *Objektive Strömungslagenklassifikation mit VERA*, Diplomarbeit am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien, Wien 2006
  
- [5] Drimmel, Julius, *Theorie und Vorhersage der Hochnebelbildung im Wiener Becken*, Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. A 10, Wien 1958, S. 410-413
  
- [6] Gultepe, Ismail, *Fog and Boundary Layer Clouds: fog Visibility and forecasting*, Birhäuser Verlag, Basel 2007
  
- [7] Hofko, Manfred, *Nebel am Flughafen Linz/Hörsching*, Projektarbeit im Rahmen der FWM Ausbildung, Linz 2001
  
- [8] Jeppesen, *Meteorology, JAA ATPL Training*, Jeppesen Sanderson Inc., Neu - Isenburg 2004
  
- [9] Jeppesen, *Operational Procedures, JAA ATPL Training*, Jeppesen Sanderson Inc., Neu - Isenburg 2004
  
- [10] Kraus, Helmut, *Die Atmosphäre der Erde*, Springer – Verlag, 3.Auflage, Berlin Heidelberg 2004

- [11] Lichtenauer, Silke, *Ortsbezogene Hochnebelvorhersage mit Hilfe eines Limited Area Modells*, Diplomarbeit am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien, Wien 2004
- [12] Liljequist, Gösta H. und Cihak, Konrad, *Allgemeine Meteorologie*, Springer – Verlag 3.Auflage, Berlin Heidelberg 2006
- [13] Manning, Christopher, *Logistic Regression (with R)*, 2007  
<http://nlp.stanford.edu/~manning/courses/ling289/logistic.pdf> (2009)
- [14] Müllauer, Eva Maria, *On the predictability of low visibility conditions at Vienna Airport*, Diplomarbeit am Institut für Meteorologie und Geophysik an der Leopold Franzens Universität Innsbruck, Innsbruck 2006
- [15] Peer, Cathleen, *An Evaluation of Weather Parameters causing Aircraft Departure and Arrival Delays at Vienna International Airport*, Diplomarbeit am Institut für Meteorologie und Geophysik an der Leopold Franzens Universität Innsbruck, Innsbruck 2003
- [16] Schandl, H., *Hölzel – Weltatlas*, Ed. Hölzel, 5.Auflage, Wien 1995, S.9
- [17] Schönwiese, Christian D., *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*, Gebrüder Borntraeger Verlag, 3. Auflage, Berlin 2000
- [18] Starke, Holger, *Fallstudien von Hochnebel im Inntal*, Diplomarbeit am Institut für Meteorologie und Geophysik an der Leopold Franzens Universität Innsbruck, Innsbruck 2004
- [19] Steinacker, Reinhold, *Eine ostalpine Strömungslagenklassifikation*, Wien 1991  
<http://www.univie.ac.at/IMG-Wien/weatherregime/STROEMUNGSLAGENKLASSIFIKATION.pdf> (2009)
- [20] Strohmayer, Adalbert, *Untersuchungen über das Auftreten von Bodennebel für den Flughafen Wien*, unveröffentlichte Arbeit, Wien 1969

- [21] Tscherteu, Emil und Wajboda, Johann, *Nebel im Klagenfurterbecken*, Cainthia II, 183./103. Jahrgang, S. 535-558, Klagenfurt 1993
- [22] Walch Dieter und Neukamp, Ernst, 1989, *Wolken Wetter*, Gräf und Unzer Verlag, 5.Auflage, München 2002
- [23] Wilks, Daniel S., *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, International Geophysics Series, Elsevier Inc., 2.Auflage, Burlington 2006
- [24] WMO, *Aerodrome Reports and Forecasts, a User Handbook to the codes*, WMO – No. 782

*Ich habe mich bemüht, sämtliche Inhaber der Bildrechte ausfindig zu machen und ihre Zustimmung zur Verwendung der Bilder in dieser Arbeit eingeholt. Sollte dennoch eine Urheberrechtsverletzung bekannt werden, ersuche ich um Meldung bei mir.*

## Danksagung

Mein Betreuer Ass. Prof. Mag. Dr. Manfred Dorninger unterstütze mich mit neuen Anregungen und hatte immer ein offenes Ohr für mich.

Ermöglicht wurde mir diese Arbeit durch die Mitarbeiter der Austro Control Österreichische Gesellschaft für Zivilluftfahrt mbH, der Abteilung Meteorologie, um nur einige wenige zu nennen Mag. Andreas Pfoser und Mag. Dr. Markus Kerschbaum. Sie standen mir immer mit Rat und Tat zur Seite und betrachteten meine Arbeit mit viel Interesse. Hans Kohlgruber und Wolfgang Dumhs halfen mir bei der Datenaufbereitung.

Meine Freunde und Studienkollegen waren stets bemüht mich mit vollen Kräften zu unterstützen, in fachlichen Fragen sowie bei persönlichen Anliegen. Mag. DI Dr. Dieter Mayer brachte mir MATLAB näher und half mir bei der Umsetzung der logistischen Regression. Mag. Anita Jurkovic und Mag. Franziska Strauss beantworteten mir viele Fragen bei dem Programm R und standen mir überdies in jeder Arbeitsphase meiner Diplomarbeit bei. OStR. Mag. Walter Treiber korrigierte meine Arbeit in der Endphase.

Meine Familie begleitete mich durch den langen Weg meines Studiums. Mit meinem Bruder Florian verbrachte ich viele arbeitsreiche, aber auch erholsame Tage im Ausseerland. Sie haben mir in so manchen moralischen Tiefs entscheidend geholfen, so dass ich mein Ziel nicht aus den Augen verlor.

Auch durch die Unterstützung und das Verständnis der Geschäftsführung und der Mitarbeiter der MeteoServe Wetterdienst GmbH, allen voran Gernot Waldsam und Mag. Eva Maria Müllauer, wurde mir ein erfolgreicher Abschluss dieser Arbeit ermöglicht.

Ihnen allen möchte ich ein herzliches Dankeschön aussprechen.

## Curriculum vitae

### Persönliche Daten

Name: Astrid DOBEK  
Geburtsdatum: 13.07.1983  
Geburtsort: Wien  
Eltern: Herbert und Vera Dobek  
Geschwister: Florian Dobek  
Familienstand: ledig, keine Kinder  
Staatsangehörigkeit: ÖSTERREICH

### Ausbildung

1989 – 1993 Volksschule, Piaristengasse, 1080 Wien  
1993 – 2001 BGRG 16, Bundes-Realgymnasium, Maroltingergasse,  
1160 Wien  
Juni 2001 Matura  
2001 Beginn des Studiums Meteorologie und Geophysik an der  
Universität Wien  
2003 Abschluss des ersten Studienabschnittes  
2009 Abschluss des 1. Teil der 2. Diplomprüfung

### Berufserfahrung

September 2003 ORF Hörfunk – Wetterredaktion, Einwöchige Ferialpraxis, Wien  
Juli 2004 Austro Control GmbH, Ferialpraxis, Wien - Schwechat  
September 2005 Austro Control GmbH, Ferialpraxis, Wien  
Seit Juli 2006 MeteoServe Wetterdienst GmbH, Meteorologin im  
operationellen Dienst, Wien

Wien, am 6. Mai 2009