

DIPLOMARBEIT

UNTERSUCHUNG DER SCHALLAUSBREITUNG

AM FLUGHAFEN WIEN SCHWECHAT

Verfasserin

Tina Maria TRAPPER

angestrebter akademischer Grad

Magistra der Naturwissenschaften (Mag.rer.nat)

Wien, Dezember 2008

Studienzahl lt. Studienblatt: A415

Studienrichtung: Meteorologie

Betreuer: O. Uni. Prof. Dr. Reinhold Steinacker

DANKSAGUNG

Ich möchte mich bei O. Uni. Prof. Dr. Steinacker für die Betreuung dieser Arbeit bedanken. Trotz eines oft sehr dicht gedrängten Terminkalenders fand er immer wieder Zeit für die Beantwortung meiner zahlreicher Fragen.

Großer Dank gebührt außerdem Dr. Markus Kerschbaum. Er hatte die Idee zu dieser Arbeit und fand stets Zeit, meteorologische Fragen mit mir zu diskutieren.

DI. Dr. Dieter Mayer war eine große Hilfe bei der Erstellung der VERA-Analysen.

Meinen Eltern und Geschwistern sei auf diesem Weg herzlich für ihre Unterstützung während der letzten Jahre gedankt. Ohne meine Familie wäre dieses Studium nicht möglich gewesen. Ihr sei diese Arbeit auch gewidmet.

ZUSAMMENFASSUNG

Durch den ständig zunehmenden Flugverkehr steigt die Lärmbelästigung für die Bevölkerung in den flughafennahen Gebieten und entlang der Flugkorridore. Seit 1992 misst die Fluglärmüberwachungsanlage FANMOS (Flight Track and Monitoring System) in den Siedlungsgebieten des Flughafens Wien Schwechat die Schallpegel aller Überflüge. Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Teil dieser Daten - nämlich zwei Sommer- und zwei Wintertage aus dem Jahr 2006 - ausgewertet werden. Die dafür nötigen Grundlagen der Schallausbreitung sowie der Einfluss der Atmosphäre auf diese werden in den Kapiteln 2 und 3 erklärt. Im Hauptteil der Arbeit erfolgt aufgrund der Komplexität des Flugverkehrs die Trennung des Datensatzes nach Starts und Landanflügen und anschließend nach den vier Pistenrichtungen am Flughafen. Zum Schluss erfolgt die statistische Auswertung der nicht normalverteilten Daten mit Hilfe des U-Tests. Von 74 gerechneten Tests ergaben 61, dass zwischen den Stichproben kein signifikanter Unterschied besteht. 13 Tests hatten jedoch das Ergebnis, dass ein signifikanter Unterschied besteht. Eine generelle Aussage ist nicht möglich, tendenziell ist aber die Annahme der Nullhypothese (kein Unterschied) wahrscheinlicher. Die Erstellung der Schallkarten mittels dem am Institut für Meteorologie und Geophysik entwickeltem Analyseverfahren VERA (Vienna Enhanced Resolution Analysis) wird ebenfalls in Kapitel 7 präsentiert.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte kein wesentlicher Unterschied zwischen den Sommer- und Wintertagen aufgezeigt werden. Die Gründe dafür sind eine möglicherweise zu kleine betrachtete Datenmenge und die geringe Überflughöhe der Messgeräte. Da diese Arbeit nur ein oberflächliches Berühren der Thematik ermöglichte, wären Auswertungen im größeren Rahmen sinnvoll und wünschenswert.

ABSTRACT

The noise disturbance for people who live in areas close to the airport and alongside air lanes increases due to the constant upstream of air traffic. The measurement equipment that is controlling the aircraft noise – FANMOS (Flight Track and Monitoring System) – has been measuring the noise level of all overflights in the settlement area of Vienna International Airport since 1992. A part of this information – two days of summer and two days of winter 2006 – shall be analyzed during the following exposition. Chapters 2 and 3 are supposed to explain the necessary basics of sound propagation and the influence of the atmosphere on the sound propagation. The main part of this diploma thesis is split into data concerning starts and approaches as well as the four available flight paths of the airport due to the complexity of air traffic. The statistical evaluation of non-normally distributed data by using the U-test concludes this exposition. 61 out of 74 tests did not show any significant difference between the samples. But 13 out of 74 tests did show a significant difference. No general conclusion can be made, but by trend the assumption of the null hypothesis (no difference) is more probable. How to create noise cards by using the analysis method VERA (Vienna Enhanced Resolution Analysis) – developed by the department of meteorology and geophysics – will be presented in chapter 7.

In conclusion: This diploma thesis wasn't able to show any significant difference between the days of summer and the days of winter. Reasons may be found in the analyzing of a too small amount of data and a too low crossing altitude of measuring instruments. It should be mentioned that this diploma thesis touches the topic only in a superficial way. Evaluation in a bigger context would be reasonable and desirable.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | EINLEITUNG | 9 |
| 1.1 | MOTIVATION | 9 |
| 1.2 | HISTORISCHER RÜCKBLICK | 9 |
| 2 | GRUNDLAGEN DER AKUSTIK | 11 |
| 2.1 | DAS HUYGENSSCHE PRINZIP | 11 |
| 2.2 | DAS GESETZ VON SNELLIUS | 11 |
| 2.3 | DEFINITION VON SCHALL | 12 |
| 2.3.1 | Das Schallfeld und die Schallfeldgrößen | 12 |
| 2.3.1.1 | Der Schalldruck | 12 |
| 2.3.1.2 | Der Schalldruckpegel | 12 |
| 2.3.1.3 | Die Schallschnelle | 13 |
| 2.3.1.4 | Der Schallschnellenpegel | 13 |
| 2.3.1.5 | Der Schallfluss | 14 |
| 2.3.1.6 | Die Dichte | 14 |
| 2.4 | DIE WELLENGLEICHUNG DER LINEAREN AKUSTIK | 15 |
| 2.4.1 | Herleitung der Wellengleichung | 15 |
| 2.4.1.1 | Die harmonische Welle | 19 |
| 2.4.2 | Die Schallgeschwindigkeit in Luft | 19 |
| 3 | DIE SCHALLAUSBREITUNG | 22 |
| 3.1 | DIE SCHALLAUSBREITUNG IN DER ATMOSPHERE | 22 |
| 3.2 | DER EINFLUSS VON TEMPERATUR UND WINDGESCHWINDIGKEIT AUF DIE SCHALLAUSBREITUNG IN DER ATMOSPHERE | 23 |
| 3.2.1 | Das vertikale Windprofil in der Ekman-Schicht | 24 |

| | | |
|---------|--|----|
| 3.2.2 | Das vertikale Temperaturprofil | 26 |
| 3.2.2.1 | Die instabile (labile) Schichtung | 26 |
| 3.2.2.2 | Die stabile Schichtung | 26 |
| 3.2.2.3 | Die neutrale Schichtung | 26 |
| 3.3 | AUSBREITUNG VON SCHALL IN DER ATMOSPHERE . . . | 27 |
| 3.3.1 | Brechung von Schallwellen | 27 |
| 3.3.2 | Reflexion | 28 |
| 3.3.3 | Beugung | 28 |
| 3.3.4 | Dämpfung | 28 |
| 4 | DIE DATENGRUNDLAGE | 30 |
| 4.1 | DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET | 30 |
| 4.2 | DIE DATENGRUNDLAGE | 32 |
| 5 | AUSWERTUNG DER DATEN | 36 |
| 5.1 | DIE STATIONSZEITREIHEN | 36 |
| 5.2 | GRUNDLAGEN DES FLUGVERKEHRS | 37 |
| 5.3 | ANFLÜGE UND ABFLÜGE | 38 |
| 6 | ARRIVALS UND DEPARTURES | 39 |
| 6.1 | ARRIVALS 10. JÄNNER 2006 | 41 |
| 6.2 | ARRIVALS 21. JULI 2006 | 42 |
| 6.3 | ARRIVALS 10. AUGUST 2006 | 42 |
| 6.4 | ARRIVALS 14. DEZEMBER 2006 | 42 |
| 6.5 | DEPARTURES 10. JÄNNER 2006 | 45 |
| 6.6 | DEPARTURES 21. JULI 2006 | 45 |
| 6.7 | DEPARTURES 10. AUGUST 2006 | 46 |
| 6.8 | DEPARTURES 14. DEZEMBER 2006 | 46 |

| | | |
|-------|---|----|
| 7 | DIE SCHALLKARTEN | 48 |
| 7.1 | EINE KURZE EINFÜHRUNG IN VERA | 48 |
| 7.2 | DIE ERGEBNISSE | 49 |
| 7.2.1 | Schallkarte der registrierten Landeanflüge vom 10. Jänner 2006 | 60 |
| 7.2.2 | Schallkarte der registrierten Starts vom 10. Jänner 2006 . . | 60 |
| 7.2.3 | Schallkarte der registrierten Landeanflüge vom 21. Juli 2006 | 61 |
| 7.2.4 | Schallkarte der registrierten Starts vom 21. Juli 2006 . . . | 61 |
| 7.2.5 | Schallkarte der registrierten Landeanflüge vom 10. Au- gust 2006 | 61 |
| 7.2.6 | Schallkarte der registrierten Starts vom 10. August 2006 . | 62 |
| 7.2.7 | Schallkarte der registrierten Landeanflüge vom 14. De- zember 2006 | 62 |
| 7.2.8 | Schallkarte der registrierten Starts vom 14. Dezember 2006 | 62 |
| 7.2.9 | Zusammenfassung | 63 |
| 7.3 | DER U-TEST | 63 |
| 7.4 | DER BOX-WHISKER-PLOT | 69 |
| 7.5 | VERGLEICH SOMMER-WINTER | 71 |
| 7.5.1 | Schallkarte der registrierten Landeanflüge im Winter . . . | 76 |
| 7.5.2 | Schallkarte der registrierten Landeanflüge im Sommer . . | 76 |
| 7.5.3 | Schallkarte der registrierten Starts im Winter | 76 |
| 7.5.4 | Schallkarte der registrierten Starts im Sommer | 76 |
| 8 | ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK | 77 |
| 8.1 | Die Datenmenge | 77 |
| 8.2 | Die Überflughöhe der Messgeräte | 78 |
| 8.3 | Der Fingerprint | 78 |

| | | |
|----|---------------------------------|----|
| 9 | BILDANHANG | 80 |
| 10 | ABBILDUNGSVERZEICHNIS | 86 |
| 11 | LITERATURVERZEICHNIS | 91 |

1 EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION

Mit rund 237 300 Flugbewegungen im Jahr 2006 ([23]) ist der Flughafen Wien-Schwechat der größte Flughafen Österreichs, er gilt als eine wichtige Ost-West-Drehscheibe. Die Verkehrsprognose für den Flughafen Wien Schwechat liegt bei 306 000 Flugbewegungen im Jahr 2015, die Technische Universität Wien prognostiziert mit der von der Flughafen Wien AG angestrebten 3. Piste rund 368 000 Flugbewegungen im Jahr 2020 ([19]).

Betrachtet man die am Flughafen Wien Schwechat eingehenden Fluglärmbeschwerden über alle zwölf Monate im Zeitraum 2001 - 2004 erkennt man eine jahreszeitliche Abhängigkeit der Anzahl der Beschwerden. So gelangt in den Sommermonaten eine deutlich höhere Anzahl von Beschwerden via Telefon oder E-Mail ein als im Winter ([20]).

Wie bereits in der Zusammenfassung erwähnt, werden seit 1992 in den Siedlungsgebieten rund um den Flughafen mittels 14 fixen und zwei mobilen Messstellen die Fluggeräuschemissionen aller startenden und landenden Flugzeuge gemessen.

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, einen Teil dieser Daten auszuwerten und den Zusammenhang zwischen der Schallausbreitung der Atmosphäre und meteorologischen Parametern wie Wind und Temperatur zu untersuchen und die Frage zu beantworten, ob es - wie die Anzahl der Beschwerden vermuten läßt - im Sommer lauter ist als im Winter.

1.2 HISTORISCHER RÜCKBLICK

Bereits in der Antike wurde der Wellencharakter des Schalls vermutet. So wurde eine Welle als „*oszillatorische Störung, die sich von der Quelle weg bewegt ohne Material über große Entfernungen zu transportieren*“ beschrieben. (aus [5], S.7)

Die Entwicklung der modernen Akustik begann Anfang des 17. Jahrhunderts. Es konnte experimentiell nachgewiesen werden, dass ein vibrierender Körper, der

einen Ton abstrahlt, die umliegende Luft zu einer oszillatorischen Bewegung der gleichen Frequenz anregt.

Die mathematische Theorie der Schallausbreitung begann mit *Isaac Newtons* (1642 - 1727) Arbeit „*Principia*“ (1686). Allerdings ist von Newtons Forschungen auf dem Gebiet der Akustik vor allem seine falsche Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Luft bekannt. Er erhielt eine Schallgeschwindigkeit von 290 m/s, die deutlich vom gemessenen Wert abwich. Erst *Laplace* berechnete 1816 die Schallgeschwindigkeit unter der Annahme isentroper Zustandsänderungen und erhielt eine Lösung, die mit den Experimenten in Einklang stand. (aus [5], S. 7)

2 GRUNDLAGEN DER AKUSTIK

Unter Akustik versteht man die „Lehre vom Schall“ , sie beschäftigt sich mit den Ursachen des Schalls, seiner Ausbreitung und seiner Auswirkung. Schall ist die Ausbreitung von kleinsten Druck und Dichteschwankungen in einem Medium (Gase, Flüssigkeiten, Festkörper). Dabei unterscheidet man zwischen

- Fluidschall (in Gasen und Flüssigkeiten)
- Körperschall (in Festkörpern)

2.1 DAS HUYGENSSCHE PRINZIP

Die Ausbreitung von Wellen läßt sich mit einer geometrischen Methode beschreiben, die von Christian Huygens im Jahre 1678 entwickelt wurde:

„Jeder Punkt einer bestehenden Wellenfront ist Ausgangspunkt einer neuen kugelförmigen Elementarwelle, die die gleiche Ausbreitungsgeschwindigkeit und Frequenz wie die ursprüngliche Wellenfront hat. Die Einhüllende aller Elementarwellen ergibt die Wellenfront zu einem späteren Zeitpunkt.“ (aus: [14], S. 1029)

2.2 DAS GESETZ VON SNELLIUS

Trifft ein Lichtstrahl auf die Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlicher Dichte (etwa Luft und Glas), so wird ein Teil der Lichtenergie reflektiert und der andere Teil geht durch die Grenzfläche in das zweite Medium über, wobei sich nach Eintritt des Lichtstrahls in das zweite Medium dessen Ausbreitungsrichtung ändert. Dieser Vorgang läßt sich durch das Gesetz von Snellius beschreiben:

$$\sin\theta_k = \frac{n_1}{n_2} \quad (1)$$

Das Verhältnis zwischen der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 und der Lichtgeschwindigkeit im Medium c_1 wird als Brechungsindex $n = \frac{c_0}{c_1}$ bezeichnet.

Mit zunehmendem Einfallswinkel wird auch der Brechungswinkel größer, bis ein kritischer Einfallswinkel θ_k erreicht wird, für den der Brechungswinkel gleich 90° ist ([14], S. 1034 ff).

2.3 DEFINITION VON SCHALL

Schall breitet sich in ruhenden Gasen und Flüssigkeiten stets als Longitudinalwelle, in Festkörpern auch als Transversalwelle aus. Dabei beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Luft bei einer Temperatur von 20°C 343m/s und in Wasser 1407m/s bei einer Temperatur von 0°C . Die Schallwellen bewegen die Teilchen des Mediums um einen mittleren Zustand, dabei wird Schallenergie transportiert. Die Schwankungen der Zustandsgrößen des Druckes p und der Dichte ρ sind im Verhältnis zu ihren Ruhegrößen fast immer relativ klein. ([5], S. 8)

2.3.1 Das Schallfeld und die Schallfeldgrößen

Als *Schallfeld* bezeichnet man einen Raum, der mit Schallwellen erfüllt ist. Dieses Schallfeld läßt sich durch die sogenannten *Schallfeldgrößen* beschreiben. Diese Schallfeldgrößen sind:

2.3.1.1 Der Schalldruck Eine Schallquelle erzeugt im Ausbreitungsmedium Schwingungen, welche Druckschwankungen verursachen. Diese Druckschwankungen werden „Schalldruck“ p' [Nm^{-2}] genannt und sind dem statischen Druck p_0 (zum Beispiel dem atmosphärischen Luftdruck) überlagert. Der Schalldruck ist ein Skalar und lässt sich wie folgt anschreiben:

$$p' = p - p_0 \quad (2)$$

2.3.1.2 Der Schalldruckpegel Die Hörschwelle des menschlichen Ohrs liegt bei einem Schalldruck von $2 \cdot 10^{-5}\text{Pa}$, seine Schmerzschwelle bei einem Schalldruck von ungefähr 20Pa . Somit umfasst der Hörbereich des Menschen

sechs Zehnerpotenzen. Um diese Spanne übersichtlich auszudrücken, wurde ein logarithmisches Maß, der sogenannte Schalldruckpegel $L_p[dB]$ eingeführt:

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{\tilde{p}^2}{p_0^2} \right) dB = 20 \lg \left(\frac{\tilde{p}}{p_0} \right) dB \quad (3)$$

Der Effektivwert des Schalldrucks \tilde{p} läßt sich mit der Formel $\tilde{p}^2 = \frac{1}{T} \int_T p^2(t) dt$ berechnen. T ist die Integrationszeit, die theoretisch unendlich sein muss. Für den Bezugswert p_0 gilt: $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} Pa$. Zu Ehren des Erfinder Graham Bell wurde als Einheit des Schalldruckpegels das dB (dezi-Bel) festgelegt.

2.3.1.3 Die Schallschnelle Die Schallschnelle $\vec{v} [ms^{-1}]$ gibt an mit welcher Wechselgeschwindigkeit \vec{v}' die Teilchen um eine mittlere Lage \vec{v}_0 schwingen. Die Schallschnelle ist im Gegensatz zum Schalldruck eine vektorielle Größe, für sie gilt:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}' \quad (4)$$

\vec{v} ist die „Gesamtgeschwindigkeit“ der Teilchen.

2.3.1.4 Der Schallschnellenpegel Der Schallschnellenpegel $L_v[dB]$ ist eine vektorielle Größe und läßt sich wie folgt berechnen:

$$L_v = 10 \lg \left(\frac{\tilde{v}^2}{v_0^2} \right) dB = 20 \lg \left(\frac{\tilde{v}}{v_0} \right) dB \quad (5)$$

Hier ist \tilde{v} der Effektivwert der Schallschnelle, für sie gilt: $\tilde{v}^2 = \int_T \vec{v}^2(t) dt$. Auch hier muss, wie beim Effektivwert des Schalldrucks, die Integrationszeit T theo-

retisch unendlich sein. Die Bezugsschnelle von v_0 hat eine Geschwindigkeit von $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ms}^{-1}$.

2.3.1.5 Der Schallfluss Der Schallfluss $q [\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$ ist definiert als das Integral der Schallschnelle \vec{v}' über eine Querschnittsfläche A :

$$q = \int_A \vec{v}' d\vec{A} \quad (6)$$

2.3.1.6 Die Dichte Zerlegt man die Dichte $\rho [\text{kgm}^{-3}]$ in einen Gleichanteil und einen Schwankungsanteil, so läßt sich diese wie folgt anschreiben:

$$\rho(\vec{x}, t) = \rho_0 + \rho'(\vec{x}, t) \quad (7)$$

Die Größen p_0 (siehe Gleichung (2)) und ρ_0 entsprechen dem Druck und der Dichte in einem Ruhezustand ohne Schall, sie sind weder vom Ort \vec{x} , noch von der Zeit t abhängig. Für ein ruhendes Medium gilt weiters, dass $\vec{v}_0 = 0$, also der Gleichanteil der Schnelle verschwindet.

Weiters wird angenommen, dass der Schwankungsanteil stets kleiner als der Gleichanteil ist:

$$p' \ll p_0 \rightarrow \left| \frac{p'}{p_0} \right| \ll 1 \quad (8)$$

$$\rho' \ll \rho_0 \rightarrow \left| \frac{\rho'}{\rho_0} \right| \ll 1 \quad (9)$$

In der Praxis sind häufig sinusförmige Schwingungen von Interesse, sie werden

auch als „harmonische Schwingung“ bezeichnet. Die harmonische Druckschwankung an einer Stelle kann mit

$$p'(t) = B \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (10)$$

dargestellt werden. Dabei ist B die Amplitude, ω die Kreisfrequenz und φ eine Phasenverschiebung. Jeder sinusförmige Zeitverlauf kann durch die drei Parameter erreicht werden. Für die Kreisfrequenz gilt dabei $\omega = 2\pi f$, wobei f die Frequenz in Hz ist ([2]).

2.4 DIE WELLENGLEICHUNG DER LINEAREN AKUSTIK

2.4.1 Herleitung der Wellengleichung

Für die Herleitung der Wellengleichung werden die Kontinuitätsgleichung, die Euler-Gleichung und die Druck-Dichte-Beziehung benötigt. Sie werden hier als gegeben vorausgesetzt.

1. *Kontinuitätsgleichung:*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (11)$$

2. *Euler-Gleichung :*

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla p \quad (12)$$

3. *Druck-Dichte-Beziehung:*

$$p = p(\rho) \quad (13)$$

Die Kontinuitätsgleichung beschreibt die Erhaltung der Masse. Für ein quell- und senkenfreies Feld gilt sie in der Form von Gleichung (11). Für ein reibungsfreies

Fluid ohne Volumenkraft beschreibt die Euler-Gleichung (12) die Impulserhaltung. Reibungs- und Volumenkräfte werden hier vernachlässigt. Sowohl der Massenerhaltungssatz (11) als auch die Impulserhaltung (12) können leicht durch eine Bilanzierung der Masse und des Impulses an einem Volumenelement hergeleitet werden. Für die Druck-Dichte-Beziehung (13) darf der Druck nicht von weiteren Größen wie der Geschwindigkeit oder dem Geschwindigkeitsgradienten abhängen. Die konkrete Form der Gleichung ist zunächst nicht von Bedeutung, lediglich die Existenz der Beziehung ist bei der Herleitung der Wellengleichung von Relevanz.

Zur Herleitung der linearen Wellengleichung werden die Gleichungen (11) bis (13) zunächst linearisiert. Dazu werden Druck, Dichte und Schallschnelle, wie oben bereits gezeigt, in Gleichanteil und Schwankungsanteil zerlegt (siehe die Gleichung für Druck (2), die Gleichung für die Dichte (7) und die Gleichung für die Schallschnelle (4)) und in die linearisierte Wellengleichung eingesetzt. Die Terme höherer Ordnung in den Schwankungsanteilen sind vernachlässigbar. Bei der Zerlegung der Schallschnelle wird außerdem angenommen, dass sich das Medium im Ruhezustand befindet, also $\vec{v}_0 = 0$ ist. Alle Bewegungen werden nur durch die Schwankung verursacht.

Somit ergibt sich nach dem Einsetzen für die Kontinuitätsgleichung :

$$\frac{\partial}{\partial t} (p_0 + p') + \nabla \cdot [(p_0 + p') \vec{v}'] = 0 \quad (14)$$

Die Größe p_0 ist eine Konstante, ihre Zeitableitung verschwindet. Weiters steht in den eckigen Klammern der Ausdruck $\rho_0 \vec{v} + \rho' \vec{v}'$. Aufgrund der Annahme (9) ist der zweite Summand gegenüber dem ersten vernachlässigbar gering. Es folgt die *linearisierte Kontinuitätsgleichung*

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot \vec{v}' = 0 \quad (15)$$

In Gleichung (12) tritt die substantielle Ableitung der Geschwindigkeit auf. Allgemein gilt

$$\frac{D\vec{v}'}{Dt} = \frac{\partial\vec{v}'}{\partial t} + (\vec{v}' \operatorname{grad})\vec{v}' \quad (16)$$

Damit folgt aus der Euler-Gleichung (12) nach dem Einsetzen der Zerlegungen (2), (4) und (7) die Beziehung

$$(\rho_0 + \rho') \left[\frac{\partial\vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}' \cdot \nabla)\vec{v} \right] = -\nabla p \quad (17)$$

Wie zuvor werden nur noch lineare Terme in den Schwankungsgrößen berücksichtigt. Alle Produkte von zwei gestrichen Größen einschließlich deren Ableitungen werden vernachlässigt. Zusätzlich verschwindet auf der rechten Seite der Gradient der Konstanten p_0 . Als linearisierte Euler-Gleichung ergibt sich:

$$\rho_0 \frac{\partial\vec{v}}{\partial t} = -\operatorname{grad} p' \quad (18)$$

Da die Druck-Dichte-Beziehung (13) nicht konkret gegeben ist, kann sie nicht auf die gleiche Weise linearisiert werden. Stattdessen wird sie in eine Taylor-Reihe entwickelt

$$p(\rho) = p(\rho_0) + (\rho - \rho_0) \frac{dp}{d\rho}(\rho_0) \quad (19)$$

Wird $p_0 = p(\rho_0)$ auf die linke Seite gebracht, liefert das Einsetzen und Vernachlässigen der Terme höherer Ordnung die Beziehung

$$p' = \rho \frac{dp}{d\rho}(\rho_0) \quad (20)$$

Die auftretende Ableitung wird mit

$$\frac{dp}{d\rho}(\rho_0) = c^2 \quad (21)$$

abgekürzt. Später wird sich zeigen, dass die so definierte Größe c die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen - also die Schallgeschwindigkeit - darstellt. Die linearisierte Druck-Dichte-Beziehung lautet schließlich

$$p' = \rho' c^2 \quad (22)$$

Um die Wellengleichung für den Schalldruck zu erhalten wird die linearisierte Kontinuitätsgleichung (11) nach der Zeit abgeleitet. Es ergibt sich:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \rho_0 \nabla \cdot \left(\frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} \right) = 0 \quad (23)$$

Die Divergenz wird von der linearisierten Euler-Gleichung (12) gebildet. Man erhält:

$$\rho_0 \operatorname{div} \left(\frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} \right) + \nabla^2 p = 0 \quad (24)$$

Subtrahiert man die beiden Gleichungen voneinander, folgt:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0 \quad (25)$$

Schließlich kann p' mit Hilfe der linearisierten Druck-Dichte-Beziehung (22) ersetzt werden. Man erhält die Wellengleichung für den Schalldruck (aus [5] S. 29).

2.4.1.1 Die harmonische Welle In einer harmonischen Welle besitzen die Größen eine sinusförmige Verteilung in Raum und Zeit. Eine harmonische Welle, die sich in x_1 -Richtung ausbreitet, läßt sich durch folgende Gleichung beschreiben:

$$p'(\vec{x}, t) = A \cos\left[\omega\left(t - \frac{x_1}{c}\right)\right] \quad (26)$$

Im Allgemeinen wird, um eine kompaktere Darstellung zu erhalten die Wellenzahl

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (27)$$

eingeführt. Sie entspricht dem Verhältnis aus Kreisfrequenz ω und Schallgeschwindigkeit c , welches gerade umgekehrt proportional zur Wellenlänge ist. Die Wellenlänge ist der räumliche Abstand der Maxima in der Welle. Damit läßt sich die Druckverteilung (30) in der Form

$$p'(\vec{x}, t) = A \cos(\omega t - kx_1) \quad (28)$$

schreiben. (siehe: [5] S. 37, vergleiche auch [9], S. 15)

2.4.2 Die Schallgeschwindigkeit in Luft

Für ein ideales Gas kann eine theoretische Druck-Dichte-Beziehung $p(\rho)$ zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit abgeleitet werden. Bereits im 17. Jahrhundert wurde dies von Newton versucht. Da er fälschlicherweise die Zustandsänderungen in Schallwellen isotherm betrachtete, berechnete er für Luft unter Normalbedingungen bei $T_0 = 293 \text{ K}$ eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von $c \approx 290 \text{ m/s}$. Dieses Ergebnis weicht deutlich von dem gemessenen Wert ab.

1816 erkannte Laplace, dass die Zustandsänderungen in Schallwellen besser durch eine isentrope (adiabatische) beschrieben werden, da Schwankungen in den Schallwellen relativ schnell ablaufen. Der Temperatenausgleich durch die Wärmeleitung in der Luft ist vernachlässigbar. Es gilt die Beziehung

$$\left(\frac{p}{p_0}\right) = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^\kappa \longrightarrow p = \frac{p_0}{\rho_0 \rho^\kappa} \quad (29)$$

wobei die Größe κ den Adiabatenexponenten bezeichnet. Dieser Exponent ist durch das Verhältnis der spezifischen Wärmen c_p und c_v gegeben: $\kappa = c_p/c_v$. Der Wert für Luft beträgt $\kappa = 1.4$. Um die Schallgeschwindigkeit zu berechnen, wird die Ableitung

$$\frac{dp}{d\rho} = \kappa \frac{p_0}{\rho_0 \rho^{\kappa-1}} = \kappa \frac{p}{\rho} \quad (30)$$

benötigt. Damit folgt

$$c^2 = \left. \frac{dp}{d\rho} \right|_{T_0} = \kappa \frac{p_0}{\rho_0} \quad (31)$$

Für ein thermisch ideales Gas gilt

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (32)$$

mit der spezifischen Gaskonstante R . Damit ergibt sich schließlich

$$c^2 = \kappa RT_0 \quad (33)$$

Für Luft unter Normalbedingungen erhält man mit dieser Formel für die Schallgeschwindigkeit den Wert $c = 343 \text{ m/s}$. Dies stimmt sehr gut mit den experimen-

tellen Beobachtungen überein. Aus Gleichung (33) ist zusätzlich ersichtlich, dass die Schallgeschwindigkeit in einem Gas proportional zur Wurzel der Temperatur ist.

3 DIE SCHALLAUSBREITUNG

3.1 DIE SCHALLAUSBREITUNG IN DER ATMOSPHERE

Es wird vereinfachend angenommen, dass ein Flugzeug eine punktförmige Schallquelle ist, die ihre Energie nach allen Seiten gleichmäßig ausstrahlt, also Kugelwellen aussendet. Für ein homogenes Medium gilt:

$$I_r = \frac{I_0}{r^2} \quad (34)$$

Wobei I_0 die auf die Flächeneinheit bezogene Energie in der Entfernung 1 m von der Schallquelle, I_r diejenige in der Entfernung r Meter bedeutet

Für die Lautstärke L gilt bei mittleren Tonhöhen: $L = 10 \log_{10} \frac{I}{I_s}$, wobei I_s die Hörschwellenenergie ist. Für die Differenz zweier Lautstärken in den Entfernungen r_1 und r_2 ergibt sich:

$$L_1 - L_2 = 10 \log_{10} \frac{I}{r_1^2 I_s} - 10 \log_{10} \frac{I}{r_2^2 I_s} = 10 \log_{10} \frac{r_2^2}{r_1^2} = 20 \log_{10} \frac{r_2}{r_1} \quad (35)$$

Kennt man also die Lautstärke in irgendeiner Entfernung, so ist ihr Verlauf längs des gesamten Schallwegs berechenbar.

Abweichungen von dem quadratischen Gesetz können durch Inhomogenitäten in dem fortleitenden Medium, zu denen vor allem auch Windeinflüsse zu rechnen sind, durch Begrenzung des Schallfeldes (Erdoberfläche), welche die kugelförmige Ausbreitung stört, und durch Absorption hervorgerufen werden ([16], S. 245).

3.2 DER EINFLUSS VON TEMPERATUR UND WINDGESCHWINDIGKEIT AUF DIE SCHALLAUSBREITUNG IN DER ATMOSPHÄRE

Die Überflughöhe der Messgeräte liegt zwischen 85 m an der Station 5 - Enzersdorf/ Fischea und 1220 m an der Station 12 - Himberg (siehe Kapitel 4.1). In dieser Höhe befinden sich die Flugzeuge in der sogenannten atmosphärischen Grenzschicht. Diese läßt sich in folgende drei Einzelschichten aufteilen:

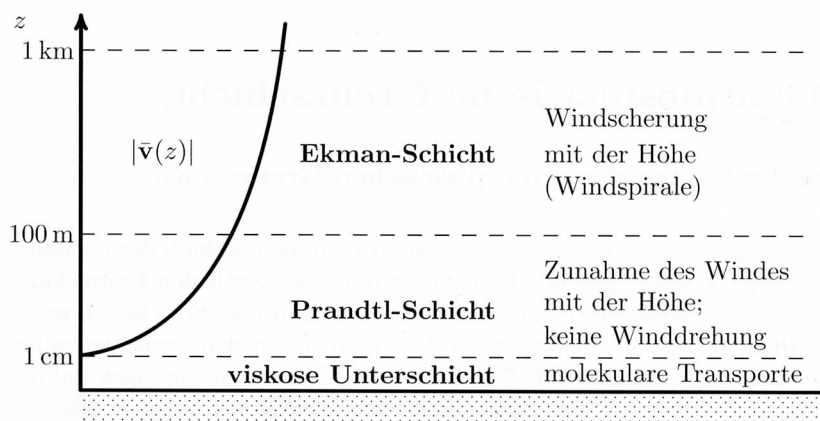


Abbildung 3.1: Der Aufbau der atmosphärischen Grenzschicht. (aus [4], S. 284)

1. die viskose Unterschicht

Sie hat eine Stärke von nur einigen Millimetern und weist keine Turbulenz auf und ist nur bei glatten Oberflächen ausgeprägt.

2. die Prandtl-Schicht

Die Prandtl-Schicht hat eine Mächtigkeit von im allgemeinen 20 bis maximal 100 Metern. Sie ist durch starke Turbulenz gekennzeichnet, allerdings sind die turbulenten Flüsse annähernd höhenkonstant. Dies ermöglicht eine vereinfachte Berechnung von Wind- und Temperaturprofilen. Die Windrichtung bleibt annähernd konstant, da der Einfluss der Corioliskraft in dieser Höhe noch gering ist.

3. die Ekman-Schicht

Die Ekman-Schicht (benannt nach dem schwedischen Ozeanographen W.

Ekman) nimmt den Hauptteil der atmosphärischen Grenzschicht ein. Sie erstreckt sich in einer Höhe von einem bis zwei Kilometern. Der Einfluss der Corioliskraft nimmt zu, es erfolgt eine Drehung des Windvektors zum geostrophischen Wind hin. Diese Höhenabhängigkeit des Betrages und der Richtung des Windvektors wird in der „Ekman-Spirale“ dargestellt:

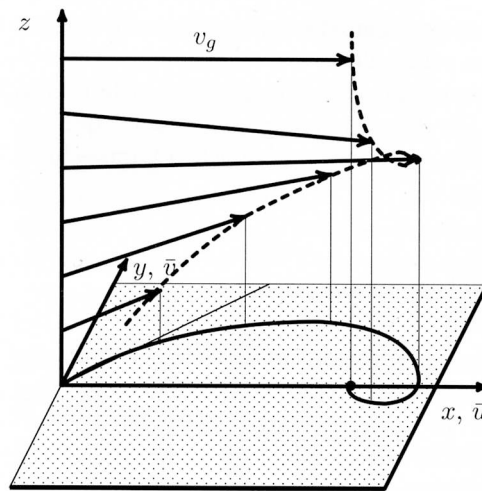


Abbildung 3.2: Die Ekman-Spirale. (aus [4], S.305)

3.2.1 Das vertikale Windprofil in der Ekman-Schicht

Nach dieser Definition befinden sich die Überflughöhen größtenteils in der Ekman-Schicht, die horizontalen Komponenten der Windgeschwindigkeit in dieser Schicht lassen sich wie folgt anschreiben:

$$-f(\bar{v} - \bar{v}_g) = \frac{\partial}{\partial z} K_m \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad (36)$$

$$f(\bar{u} - \bar{u}_g) = \frac{\partial}{\partial z} K_m \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \quad (37)$$

\bar{u}_g und \bar{v}_g sind die Komponenten des gemittelten geostrophischen Windes, \bar{u} und \bar{v} sind die Komponenten des mittleren wahren Windes. K_m wird als turbulenter

Diffusionskoeffizient bezeichnet. Um die Arbeit nicht mit Theorie zu überladen, wurde auf die Herleitung dieser beiden Formeln verzichtet, sie kann in ([4], S. 302 ff) nachgelesen werden.

Zum Lösen dieser beiden Gleichungen werden zwei Randbedingungen benötigt:

$$f r z = 0 \quad \bar{u} = \bar{v} = 0 \quad (38)$$

$$f r z \rightarrow \infty \quad u = \bar{u}_g, \bar{v} = \bar{v}_g \quad (39)$$

Löst man die beiden Gleichungen (36) und (37) mit diesen Randbedingungen und orientiert man d das Koordinatensystem so, dass die x-Achse die Richtung des geostrophischen Windes \bar{v}_g hat, so erhält man:

$$\bar{u}(z) = \bar{u}_g \left[1 - \exp\left(-\frac{z}{D}\right) \cos \frac{z}{D} \right] - \bar{v}_g \exp\left(-\frac{z}{D}\right) \sin \frac{z}{D} \quad (40)$$

$$\bar{v}(z) = \bar{v}_g \left[1 - \exp\left(-\frac{z}{D}\right) \cos \frac{z}{D} \right] + \bar{u}_g \exp\left(-\frac{z}{D}\right) \sin \frac{z}{D} \quad (41)$$

mit

$$D = \sqrt{2 \frac{K_m}{f}} \quad (42)$$

Berechnet man aus den Gleichungen 40 und 41 den Windvektoren für verschiedene Höhen, so erhält man die Ekman-Spirale und somit das Windprofil des mittleren Windes für die Ekman-Schicht. Bei dieser Betrachtung wurde ein konstanter turbulenter Diffusionskoeffizient angenommen. Diese Annahme entspricht nicht den realen Verhältnissen der atmosphärischen Grenzschicht, dennoch gibt die Ekman-Spirale den Höhenverlauf des mittleren Windes recht gut wieder. (aus [4])

3.2.2 Das vertikale Temperaturprofil

Beim vertikalen Temperaturprofil unterscheidet man zwischen 3 möglichen atmosphärischen Schichtungen:

3.2.2.1 Die instabile (labile) Schichtung Instabile Schichtung tritt zum Beispiel an sonnigen Tagen im Frühling und Sommer auf. Bei instabiler geschichteter Atmosphäre ist die Temperaturänderung mit der Höhe größer als der adiabatische Temperaturgradient $\gamma_a = -9,8 \cdot 10^{-3} \frac{K}{m}$. Ein Luftpaket erscheint schon nach kurzem Aufsteigen wärmer als seine Umgebung und steigt rasch auf. (aus [11], S. 24)

3.2.2.2 Die stabile Schichtung Durch Bodenabstrahlung verursachte stabile Schichtung tritt vor allem in klaren Nächten auf. Typische vertikale Profile von Temperatur und Wind sind in den folgenden beiden Abbildungen dargestellt. Eine Temperaturzunahme in den unteren Schichten ist charakteristisch für eine stabile Atmosphäre. Hier ist die Temperaturzunahme mit der Höhe kleiner als der adiabatische Temperaturgradient. Vertikale Bewegungen finden in einer stabilen Atmosphäre kaum statt, was eine gute Durchmischung der Atmosphäre verhindert. (aus [11], S. 25)

3.2.2.3 Die neutrale Schichtung Die neutrale Schichtung ist der Grenzfall zwischen den beiden oben vorgestellten Schichtungen. Die vertikale Temperaturänderung entspricht genau dem adiabatischen Temperaturänderungen vertikalbewegter Luftänderungen. Anders formuliert: die Änderung der Temperatur mit der Höhe entspricht näherungsweise dem adiabatischen Temperaturgradienten. Aufgrund von fehlender Konvektion gibt es in der neutralen Schichtung kaum Wolkenbildung. (aus [11], S. 25)

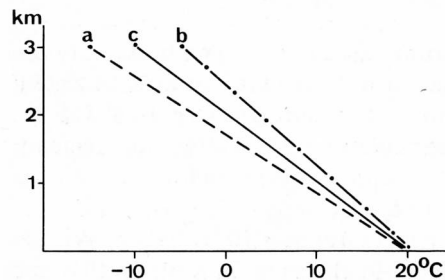


Abbildung 3.3: Labile (a), stabile (b) und neutrale Schichtung (c). (aus [11], S. 24)

3.3 AUSBREITUNG VON SCHALL IN DER ATMOSPHÄRE

In einer Atmosphäre ohne Wind und mit konstanter Temperatur wäre die Schallgeschwindigkeit in jeder beliebigen Höhe gleich - Schallwellen würden sich geradlinig ausbreiten. Da sich in der realen Atmosphäre Temperatur und Wind mit der Höhe ändern, kann nicht von einer einheitlichen Schallgeschwindigkeit ausgegangen werden.

3.3.1 Brechung von Schallwellen

Wie in Gleichung (33) beschrieben, hängt die Schallgeschwindigkeit von der Temperatur ab. Trifft eine Schallwelle in der Atmosphäre auf unterschiedlich warme Luftschichten, so verläuft ihre Ausbreitung nicht mehr geradlinig, sondern gekrümmt: sie wird nach dem Gesetz von Snellius (vgl. Abschnitt 2.2) gebrochen.

Nimmt nun die Schallgeschwindigkeit aufgrund von Temperaturabnahme mit der Höhe ab oder erfolgt eine sogenannte „Gegenwindausbreitung“ (der Wind weht von Beobachter Richtung Schallquelle), so werden die Schallwellen nach oben hin gebrochen. Dabei entsteht ein akustischer Schatten, in den die Schallwellen nicht direkt eintreffen können.

Nimmt hingegen die Temperatur mit der Höhe zu (Inversion) oder erfolgt auch eine „Mitwindausbreitung“, so werden die Schallwellen zum Boden hin gebro-

chen. Der Schall ist über weite Distanzen gut hörbar. Dies ist vor allem in klaren Nächten oder während winterlichen Nebellagen der Fall.

Je stärker der Wind weht, desto deutlicher ist auch der Effekt der Mitwind - oder Gegenwindausbreitung ([10])

3.3.2 Reflexion

Trifft eine Schallwelle auf ein Hindernis, so wird sie teilweise reflektiert. Dabei gilt das Reflexionsgesetz: Einfallswinkel ist gleich Reflexionswinkel ([2]) Je nach Frequenz und Amplitude kann es dabei zu einer Verstärkung oder Abschwächung der Schallamplitude kommen. Die Materialeigenschaften des Hindernisses (Dichte, Porosität, usw.) sind entscheidend für das Maß an Reflexion. Beton und Marmor sind „schallhartes“ Material und Schall wird vollständig reflektiert. Schnee hingegen ist „schallweich“ , nur wenig Schall wird reflektiert ([10])

3.3.3 Beugung

Die Wellenlänge des hörbaren Schalls liegt zwischen 1,6 cm und 20 m - um Hindernisse dieser Größenordnung werden Schallwellen gebeugt (siehe dazu Abschnitt 2.1). Durch die Beugung von Schallwellen ist es möglich, dass Schallenergie in akustische Schatten gelangen kann. Daher ist es im akustischen Schatten nicht vollkommen ruhig.

3.3.4 Dämpfung

Mit zunehmender Ausbreitung von Schallwellen in der Atmosphäre verlieren diese an Intensität. Dafür gibt es zwei Gründe:

Die geometrische Ausbreitung

Geht man von einer punktförmigen Schallquelle (z.B.: Flugzeug), welche ihre Energie in alle Richtungen gleichmäßig ausstrahlt, aus so läßt sich ihre Schallenergie anschreiben als

$$I_s = \frac{I_0}{r^2} \quad (43)$$

wobei I_0 die auf die Flächeneinheit bezogene Energie in der Entfernung von 1 m von der Schallquelle, I_r diejenige in der Entfernung r m bedeutet.

Die Schallenergie nimmt mit zunehmender Entfernung von der Quelle ab. Bei einer Punktquelle (z.B. Flugzeug) breiten sich die Schallwellen kugelförmig aus, der Schallpegel reduziert sich um 6 dB je Verdoppelung des Abstands zur Quelle. Bei einer Linienquelle (z.B. dicht befahrene Straße), breiten sich die Schallwellen zylinderförmig aus, der Schallpegel nimmt lediglich um 3 dB je Abstandsverdoppelung ab. ([10])

Die atmosphärische Absorption

Durch innere Reibung und Wärmeleitung der Luftmoleküle verlieren Schallwellen zusätzlich an Schallenergie. Dieser Verlust ist von der Lufttemperatur und der Luftfeuchte abhängig und wird *atmosphärische Absorption* genannt. ([16] , S. 247 vergleiche auch [10])

4 DIE DATENGRUNDLAGE

4.1 DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, gibt es seit dem Jahr 1992 in den Siedlungsgebieten des Flughafens Wien Schwechat die Fluglärmüberwachungsanlage *FANOMOS (Flight Track and Noise Monitoring System)* ([7] - Auswirkungen des Teilvertrages, S. 1). Prinzipiell wird mittels dieser Fluglärmüberwachungsanlage jedes Lärmereignis gemessen, das sich in einem Pegelbereich von 20 dB bis 130 dB befindet.

Ob ein Lärmereignis abgespeichert wird, ist von zwei Parametern abhängig:

- der Lautstärke des Lärmereignisses
- der Dauer des Lärmereignisses

Die Schwellwerte für die Lautstärke und die Dauer variieren je nach Standort der Stationen. Für die Messstellen im Nahbereich muss ein Lärmereignis am Tag 65 dB und in der Nacht 60 dB überschreiten und mindestens 8 bis 15 Sekunden (je nach Messstelle) andauern. Bei den abseits liegenden Messstellen wie Wien Donaustadt (1), Rauchenwarth (8), Himberg (12), Karlsdorf (13) und Maria Lanzendorf (15) liegen die Werte bei 60 dB und 55 dB.



Abbildung 4.1: Die graphische Darstellung der Messstationen

„Die Zuordnung der Lärmereignisse zum Verursacher erfolgt automatisch mittels der Flugspuren. Um jede Messstelle wird rechnerisch eine Halbkugel mit einem frei definierbaren Radius (hier 4 km) gebildet. Wenn nun eine Flugspur zum gleichen Zeitpunkt wie das Lärmereignis durch diese Halbkugel führt, dann wird die Fluginformation dem Ereignis zugeordnet. Werden mehrere Flüge zur gleichen Zeit registriert, dann wird die Fluginformation der nächsten Flugspur korreliert. Diese Zuordnung wird aber von unserer Seite (den Mitarbeitern der Umwelta-bteilung des Flughafens Wien Schwechat, Anmerkung) noch händisch überprüft. Das System rechnet dann aus den Ereignissen mit Zuordnung die Leq-Werte für Flugverkehr und aus den nicht zugeordneten Werten die Leq-Werte¹ für Fremdgeräusche. Damit ist eine Eindeutige Trennung zwischen Fluglärm und Umgebungs-

¹ Als Leq wird der äquivalente Dauerschallpegel. Er ist ein rechnerischer Wert der jede Flugwegung einbezieht und über einen definierten Zeitraum mittelt. Als Grundlage dienen dabei meist die sechs verkehrsreichsten Monate. (aus: [23])

lärm gegeben.” (²)

Die in Abbildung 4.1 dargestellten Stationen befinden sich in:

| STATION | ORT | ÜBERFLUGSHÖHE |
|---------|---------------------|---------------|
| 1 | Wien-Essling | 700 |
| 2 | Gross-Enzersdorf | 450 |
| 3 | Fischamend | 800 |
| 4 | Klein-Neusiedl | 160 |
| 5 | Enzersdorf/ Fischea | 85 |
| 6 | Schwadorf | 94 |
| 7 | Margarethen/ Moos | 250 |
| 8 | Rauchenwarth | 760 |
| 9 | Zwölfaxing | 910 |
| 10 | Schwechat | 250 |
| 11 | Wien Simmering | 350 |
| 12 | Himberg | 1220 |
| 13 | Karlsdorf | k.A. |
| 15 | Maria Lanzendorf | 240 |

Abbildung 4.2: Die Messstationen

4.2 DIE DATENGRUNDLAGE

Nach dem Gesetz von Snellius (Abschnitt 2.2) wird Schall gebrochen, wenn er von einem Medium in ein anderes Medium mit unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit übergeht. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen von der Temperatur abhängig ist, spielt die thermische Schichtung bei der Schallausbreitung eine entscheidende Rolle. In dieser Arbeit soll hauptsächlich der Einfluss der thermischen Schichtung auf die Ausbreitung untersucht werden. Die beeinflussenden Effekte von Windrichtung und Windstärke werden nicht betrachtet. Die Betrachtung des gesamten FANMOS-Datensatzes würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, daher wurden anhand der thermischen Schichtung aus dem

² E-Mail von Ing. Röhler, Flughafen Wien AG, Umweltabteilung am 18.07.08

gesamten Datensatz vier Tage für Fallstudien ausgewählt. Diese Tage wurden anhand der Radiosondenaufstiege ausgesucht. Da am Flughafen Wien-Schwechat keine Aufstiege durchgeführt werden, wurden jene der Station Wien-Hohe Warte von 12 UTC verwendet³. Folgende Tage wurden ausgewählt.:

- zwei Inversionstage als Beispiele für den Winter und zwar der 10. Jänner 2006 und der 14. Dezember 2006
- zwei inversionsfreie Tage als Beispiele für den Sommer und zwar der 21. Juni 2006 und der 10. August 2006.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Radiosondenaufstiege für die Station Wien-Hohe Warte um 12 UTC:

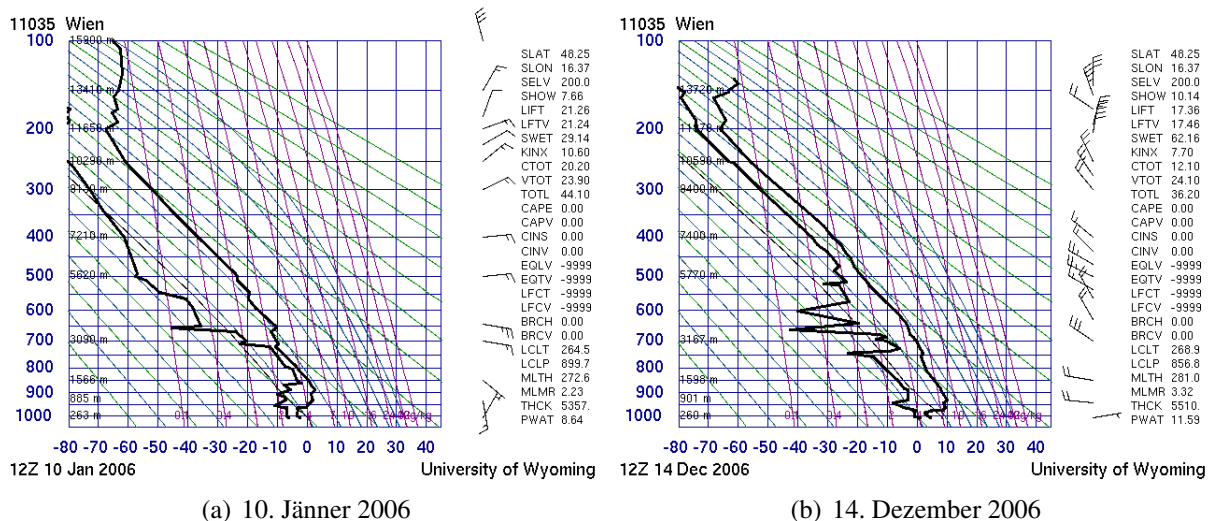


Abbildung 4.3: Die Radiosondenaufstiege der Station Wien-Hohe Warte um 12 UTC für die beiden Wintertage.

³ Quelle: University of Wyoming: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

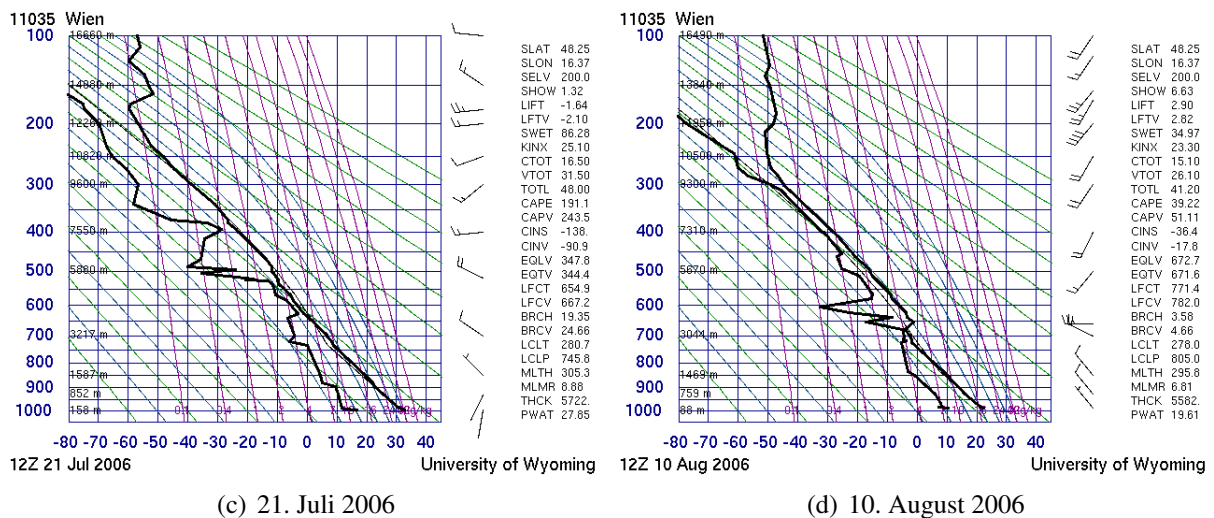
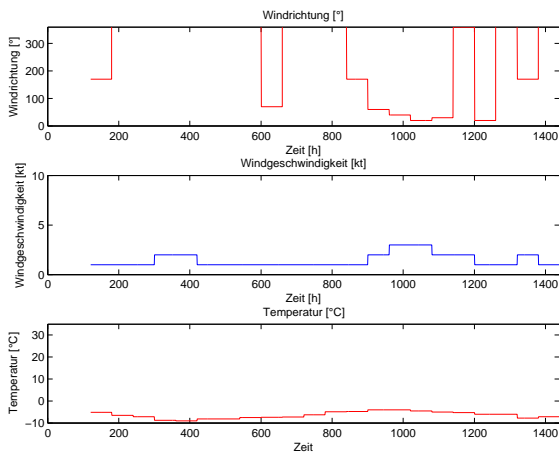
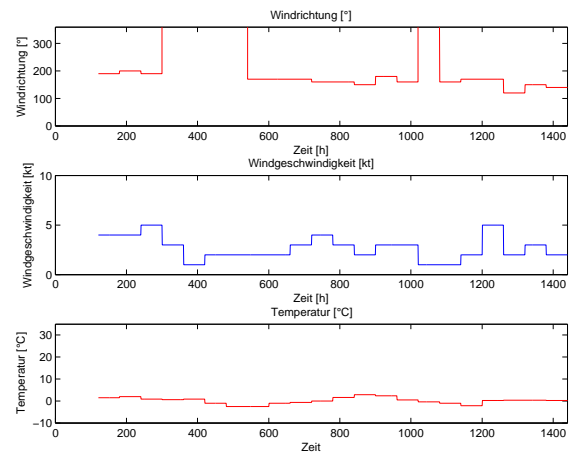


Abbildung 4.4: Die Radiosondenaufstiege Wien-Hohe Warte um 12 UTC für die beiden Sommertage.

Betrachtet man die Radiosondenaufstiege für alle vier Tage, so läßt sich leicht erkennen, dass an jedem Tag in den untersten atmosphärischen Schichten und am Boden schwacher umdrehender Wind herrscht. An allen vier Tagen schwankt die Windstärke an allen Tagen zwischen 2 und 5 Knoten (siehe Abbildung 4.4 und 4.5). Lediglich am 10. August erreicht der Wind in der Nacht eine Stärke von ca 6 Knoten. Am 14. Dezember und 10. August weht der Wind aus nördlicher bis nordwestlicher und westlicher Richtung. Am 10. Jänner und dem 21. Juni ist die Windrichtung umdrehend. Fehlende Daten im Datensatz stehen für umdrehenden Wind.

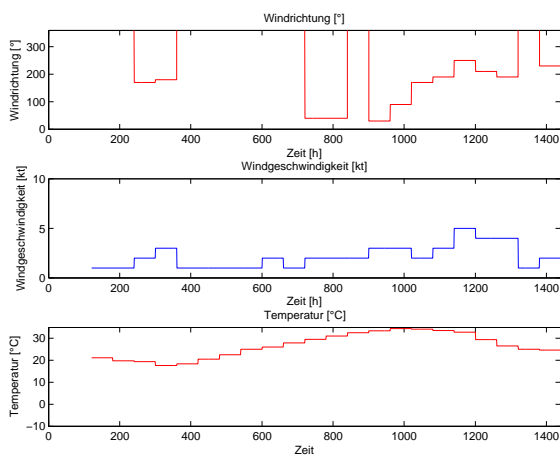


(e) 10. Jänner 2006

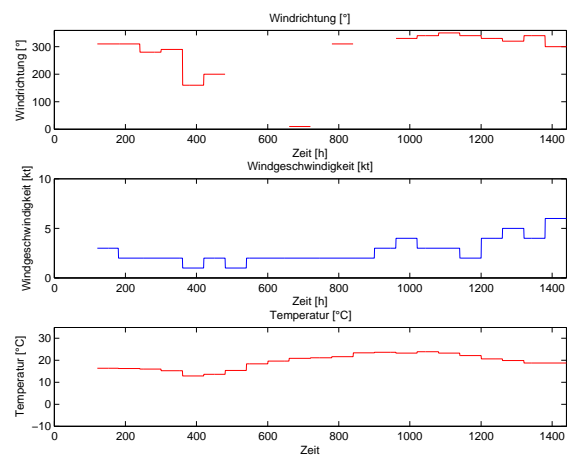


(f) 14. Dezember 2006

Abbildung 4.5: Windstärke, Windrichtung und Temperatur für die beiden Wintertage. Auf der Abszissen der Grafiken sind die Minuten in MEWZ aufgetragen.



(g) 21. Juni 2006



(h) 10. August 2006

Abbildung 4.6: Windstärke, Windrichtung und Temperatur für die beiden Sommertage. Um die verschiedenen Tage besser miteinander vergleichen zu können, wurden auch hier auf der Abszissen die Minuten in MEWZ aufgetragen.

5 AUSWERTUNG DER DATEN

Die Anzahl der Messungen pro Tag schwankt stark, von 544 Messungen am 10. August zu 635 Messungen am 21. Juni, 730 Messungen am 10. Jänner bis 734 Messungen am 14. Dezember. Die Anzahl der Messungen ist im Winter deutlich höher als im Sommer. Die Frage, ob diese Tatsache bereits auf eine stärkere Schallausbreitung im Winter hindeutet, kann hier noch nicht beantwortet werden.

5.1 DIE STATIONSZEITREIHEN

Auch an den einzelnen Stationen schwankt die Anzahl der Messungen sehr stark. So wurden an der Station 11 in Wien Simmering an den ausgewählten vier Tagen insgesamt 74 Überflüge registriert, in Margarethen/ Moos an der Station 7 hingegen gab es 427 Lärmereignisse. Der Unterschied soll in den folgenden Abbildungen deutlichgemacht werden:

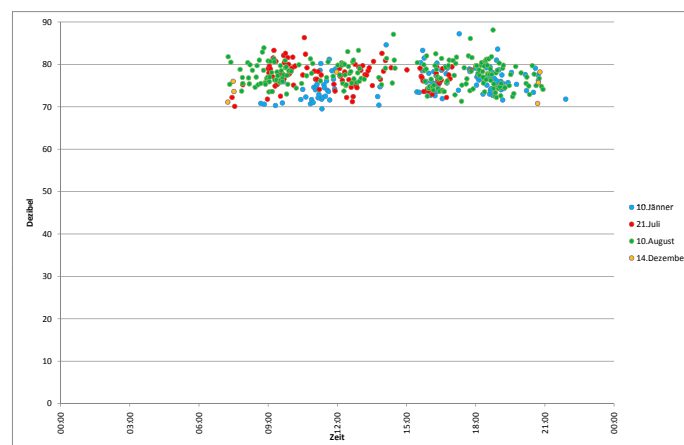


Abbildung 5.1: Die Messungen der Station 7 - Margarethen/ Moos

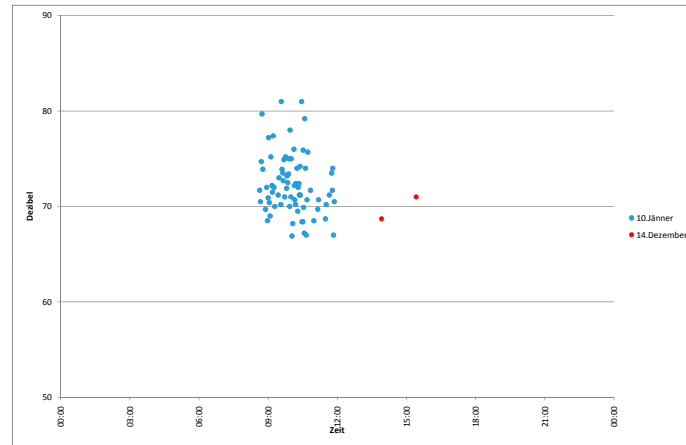


Abbildung 5.2: Die Anzahl der Messungen der Station 11 - Wien Simmering

Betrachtet man die beiden Abbildungen, fällt sofort ein großer Unterschied auf: während Station Margarethen/ Moos an jedem der vier Tage, vereinfacht gesagt also zu jeder Jahreszeit, Überflüge misst, tut die Station Wien-Simmering dies nur an den beiden Wintertagen. Die Frage, ob dies bereits ein Hinweis auf die unterschiedlich starke Schallausbreitung zwischen Sommer und Winter ist, wird verneint. Folgender entscheidender Faktor darf nicht vergessen werden: die Flugbahnen der Flugzeuge.

5.2 GRUNDLAGEN DES FLUGVERKEHRS

Flugzeuge starten und landen aus Sicherheitsgründen stets gegen den Wind, die Windrichtung entscheidet also, aus welcher Richtung Flugzeuge anfliegen und in welche Richtung sie starten. So erfolgen die Landungen bei westlicher Windrichtung über Margarethen/ Moos (Piste 34) bzw. über Klein-Neusiedl (Piste 29). Gestartet wird Richtung Schwechat (Piste 29).

Bei Windstille erfolgen Landungen über Groß-Enzersdorf (Piste 16), die Starts Richtung Schwechat (Piste 29). Während der Stoßzeiten werden zusätzlich bei guter Sicht die Landerichtungen 11 und 16 in Betrieb genommen.



Abbildung 5.3: Die Pistenrichtungen am Flughafen Wien Schwechat

5.3 ANFLÜGE UND ABFLÜGE

Ein weiterer wichtiger Unterschied liegt darin, ob sich die Flugzeuge beim Start oder beim Landeanflug befinden. Die meisten Landeanflüge am Flughafen Wien Schwechat sind sogenannte ILS-Anflüge. Ein Instrumentenlandesystem (ILS) ist ein System, das dem Piloten eines Flugzeuges bei Anflug und Landung mittels zweier Leitstrahlen, Landekurs (Informationen über den Kurs) und einem Gleitpfad (Informationen über Höhe) unterstützt.

Flugzeuge fliegen auf einer vorgegebenen Flugroute, diese Route ist von einem Korridor umgeben, welchen die Flugzeuge nicht verlassen dürfen. Vom ILS-System unterstützte Flugzeuge befinden sich fast immer punktgenau auf dem vorgegebenen Gleitpfad. Starts werden nicht so genau geflogen, hier folgt der Pilot den Anweisungen des Towers. Es erscheint daher sinnvoll, die Starts und Landeanflüge getrennt zu betrachten.

6 ARRIVALS UND DEPARTURES

In diesem Kapitel sollen die Erkenntnisse, die aus der nach Starts und Landeanflügen getrennten Beobachtung der Daten gewonnen wurden, präsentiert werden.

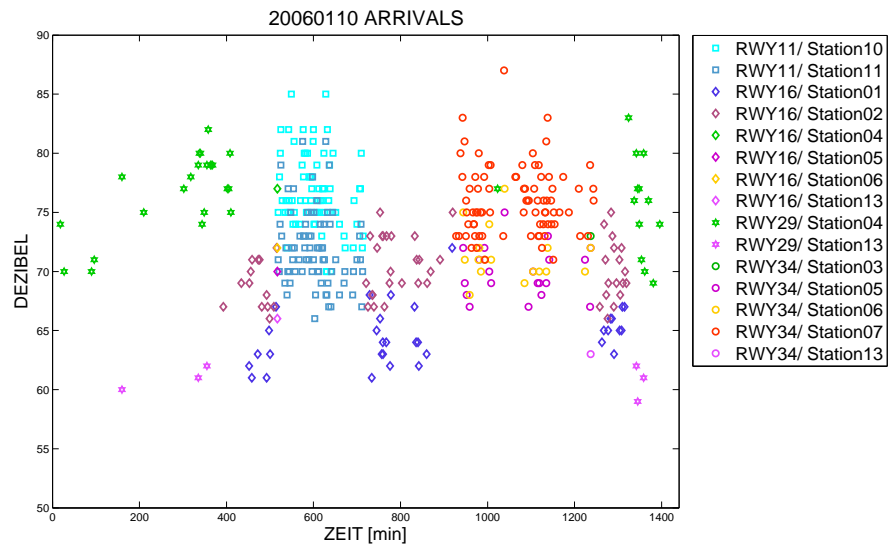


Abbildung 6.1: Zeitreihe aller gemessenen Landeanflüge vom 10. Jänner 2006.

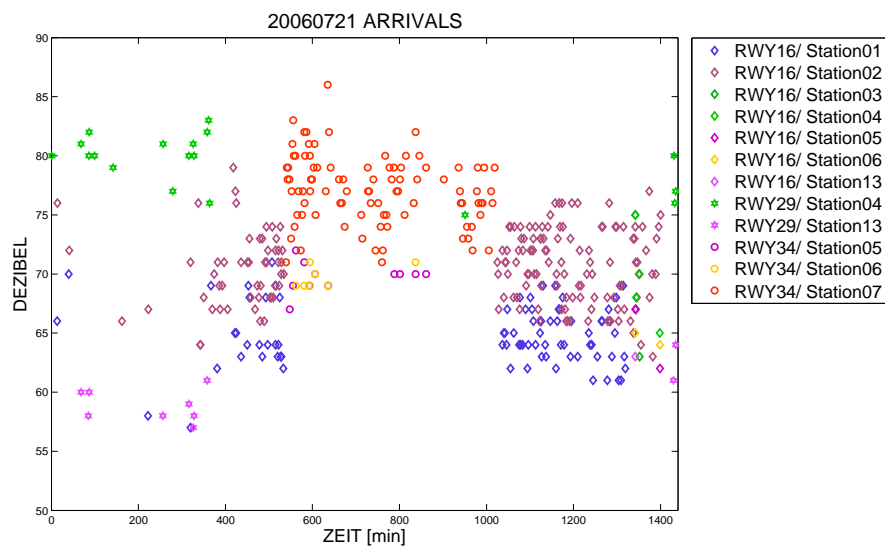


Abbildung 6.2: Zeitreihe aller gemessenen Landeanflüge vom 21. Juli 2006.

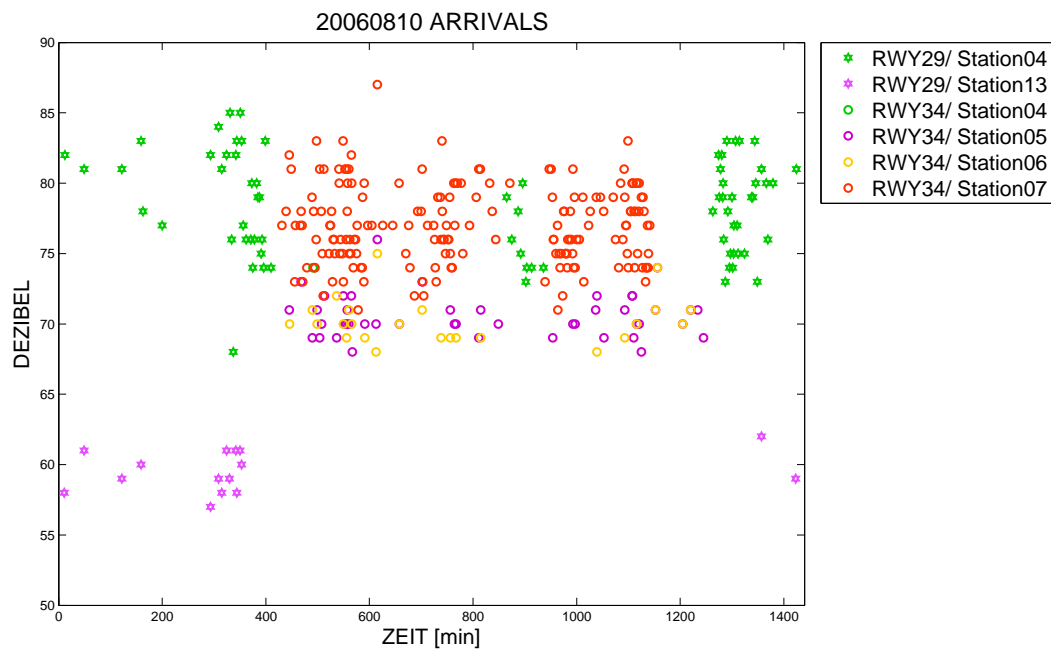


Abbildung 6.3: Zeitreihe aller gemessenen Landeanflüge vom 10. August 2006.

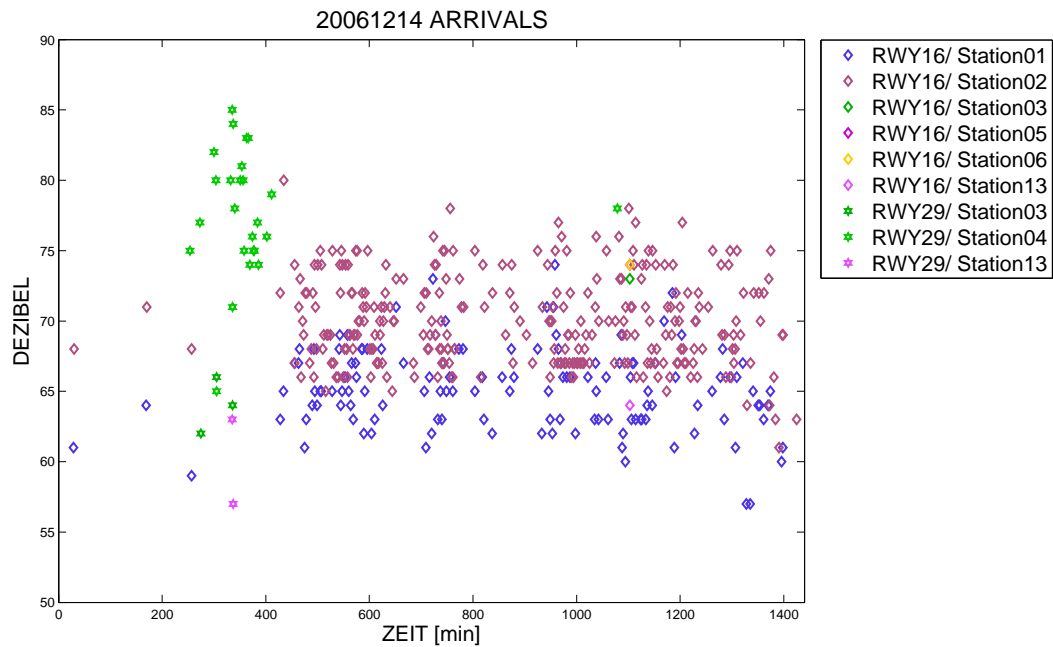


Abbildung 6.4: Zeitreihe aller gemessenen Landeanflüge vom 14. Dezember 2006.

Vergleicht man nun die Abbildungen miteinander, so lassen sich folgende Aussagen treffen:

6.1 ARRIVALS 10. JÄNNER 2006

Aus dem in Abbildung 6.1 dargestellten zeitlichen Verlauf der Lärmereignisse kann man erkennen, dass sich die angeflogene Landebahn im Laufe des Tages ändert. So wurde an diesem Tag in der Früh und am Abend Landebahn 29 für Landungen benutzt, zu Mittag war Landebahn 11 in Betrieb, nachmittags wurde auf der Piste 34 gelandet, den ganzen Tag über war die Piste 16 in Betrieb.

Die meisten Meldungen gab es bei Landungen auf der Runway 11 mit 148 Lärmereignissen, am häufigsten wurden Landeanflüge auf die Landebahn 34 an der Station 7 gemessen. Das leiseste Lärmereignis gab es beim Landeanflug auf die Piste 29 an der Station 13 mit 59,3 dB, das lauteste Ereignis gab es hingegen beim Landeanflug auf die Piste 34 an der Station 7 mit 87,2 dB. Die geometrischen Mittelwerte der verschiedenen Stationen schwanken zwischen 61,2 dB an der Station 13 und 76,99 dB an der Station 10. Es ist dabei zu bemerken, dass sich der geometrische Mittelwert an der Station 13 nur aus 6 Werten ergibt, während es an der Station 10 74 registrierte Lärmereignisse gibt.

Zur Mittelwertberechnung wurde anstatt des arithmetischen Mittelwertes der geometrische Mittelwert \bar{a}_G verwendet. Da es sich bei Dezibel um eine logarithmische Verteilung handelt, erscheint dies sinnvoll. Er wird mit der Formel

$$\bar{a}_G = \sqrt[n]{\prod a_i} = \sqrt[n]{(a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_n)} \quad (44)$$

berechnet, wobei

$$\lg \bar{a}_G = \frac{1}{n} \sum \lg a_i \quad (45)$$

gilt. „lg“ ist dabei die Abkürzung für den dekadischen Logarithmus.

6.2 ARRIVALS 21. JULI 2006

Bei den Landeanflügen am 21. Juli ergibt sich ein ähnliches Bild wie für den 10. Jänner, nur wurde an diesem Tag die Piste 11 nicht angefliegen.

An diesem Tag gab es mit 255 Meldungen die meisten registrierten Lärmereignisse bei Anflügen auf die Piste 16. Das leiseste Lärmereignis gab es beim Landeanflug auf die Piste 16 an der Station 1 mit 57,0 dB, das lauteste Ereignis gab es hingegen beim Landeanflug auf die Piste 34 an der Station 7 mit 86,3 dB. Die geometrischen Mittelwerte der verschiedenen Stationen schwanken zwischen 60,1 dB an der Station 13 (10 registrierte Überflüge) und 79,87 dB (18 registrierte Überflüge) an der Station 4.

6.3 ARRIVALS 10. AUGUST 2006

Im Vergleich dazu wurde am 10. August hauptsächlich die Landebahn 29 angefliegen, nur in der Früh und am Abend wurde kurz die Piste 34 benutzt. Am leistungsfähigsten war es bei Anflügen auf die Runway 29 an der Station 13 mit 57,8 dB, am lautesten war es bei Landungen auf der Piste 34 an der Station 7 mit 91,0 dB. Die meisten gemessenen Überflüge gab es bei Landeanflügen auf die Piste 34. Die geometrischen Mittelwerte der Stationen liegen zwischen 59,9 dB an der Station 13 (15 registrierte Überflüge) und 78,8 dB (72 registrierte Überflüge) an der Station 4.

6.4 ARRIVALS 14. DEZEMBER 2006

Am 14. Dezember wurde hauptsächlich die Landebahn 16 angefliegen, nur am Morgen war die Piste 29 in Betrieb. Das leiseste Lärmereignis gab es bei Anflügen auf die Piste 16 an der Station 1 mit 57 dB, das lauteste Ereignis gab es bei Landeanflügen auf die Piste 29 an der Station 4 mit 85,5 dB. Die geometrischen Mittelwerte der verschiedenen Stationen schwanken zwischen 61,9 dB an der Station 13 und 78,2 dB an der Station 4. Der geometrische Mittelwert an der Station 13 entsteht durch nur 3, der Mittelwert an der Station 4 durch 25 Lärmereignissen.

Mit 414 Messungen gab es bei Anflügen auf die Piste 16 die meisten Lärmereignisse.

ZUSAMMENFASSUNG ARRIVALS

Betrachtet man die Abbildungen 6.1 bis 6.4, so lassen sich folgende zusammenfassende Aussagen treffen:

- An Tagen, an denen die Piste 34 in Betrieb war, gab es bei Anflügen auf diese Piste an der Station 7 - Margarethen/ Moos die lautesten Lärmereignisse.
- Die leisesten Lärmereignisse gab es entweder bei Landeanflügen auf die Piste 16 an der Station 1 - Wien Essling, oder bei Anflügen auf die Piste 29 an der Station 13 - Karlsdorf. Dies ist nicht weiter überraschend, da diese Stationen vom Flughafen Wien Schwechat bereits sehr weit entfernt liegen.

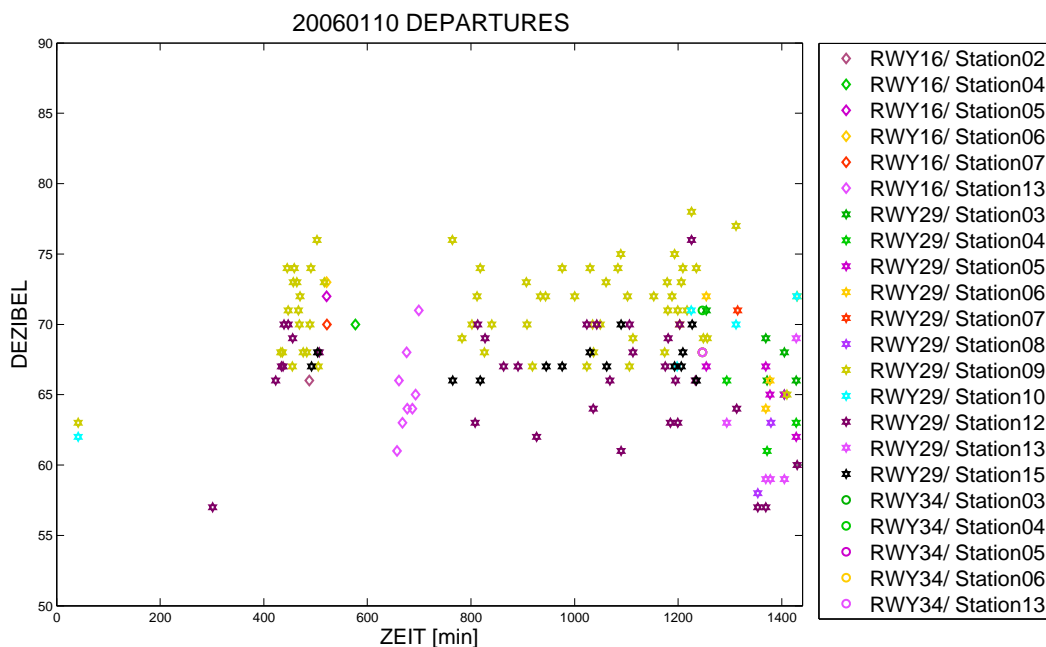


Abbildung 6.5: Zeitreihe aller gemessenen Starts vom 10. Jänner 2006.

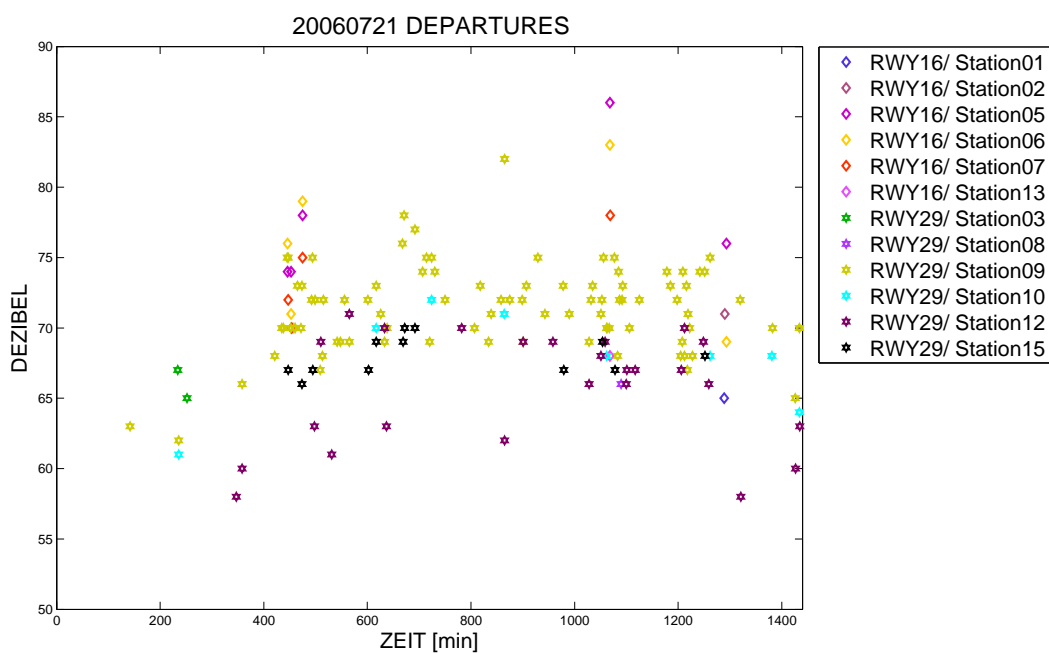


Abbildung 6.6: Zeitreihe aller gemessenen Starts vom 21. Juli 2006.

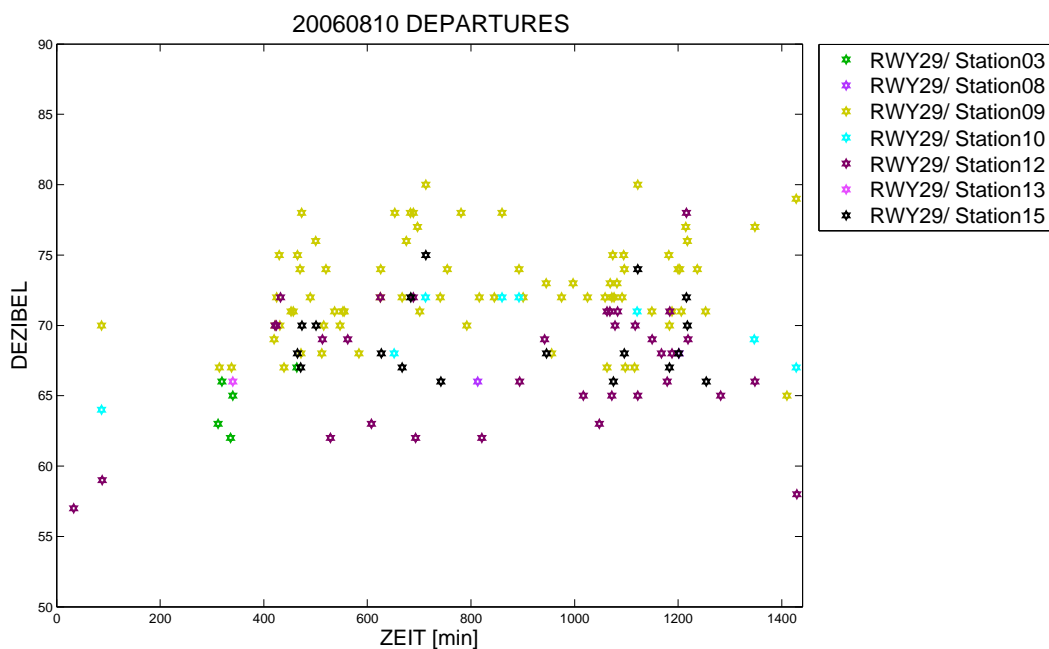


Abbildung 6.7: Zeitreihe aller gemessenen Starts vom 10. August 2006.

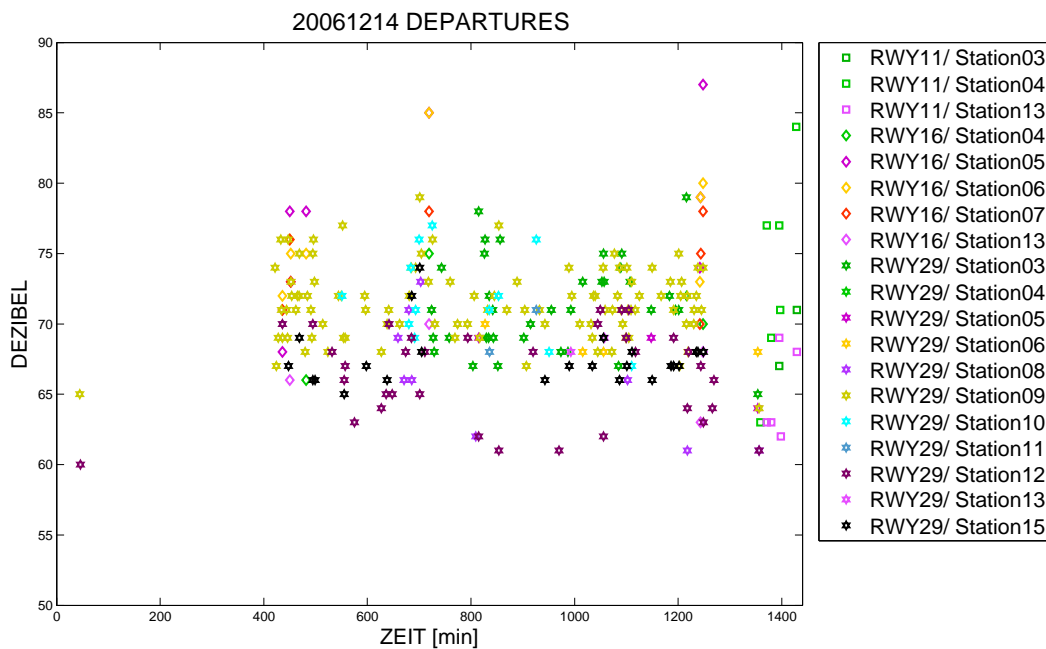


Abbildung 6.8: Zeitreihe aller gemessenen Starts vom 14. Dezember 2006.

Betrachtet man die Abbildungen 6.5 bis 6.8, so kann man folgende Aussagen treffen:

6.5 DEPARTURES 10. JÄNNER 2006

Am 10. Jänner wurde hauptsächlich über die Piste 29 gestartet, zu Mittag war kurz die Piste 16 in Betrieb. Das leiseste Lärmereignis gab es bei Starts von der Piste 29 an der Station 12 mit 57,6 dB, das lauteste Ereignis gab es bei Starts von der Piste 29 an der Station 9 mit 78,9 dB. Die geometrischen Mittelwerte der verschiedenen Stationen schwanken zwischen 62,3 dB an der Station 13 (5 Überflüge) und 75,5 dB an der Station 5 (51 Überflüge).

6.6 DEPARTURES 21. JULI 2006

Am 21. Juli wurde nur über die Piste 16 und die Piste 29 gestartet. An diesem Tag gab es mit 135 Messungen die meisten Lärmereignisse bei Starts von der Piste

29. Das leiseste Ereignis gab es es bei Starts von der Piste 29 an der Station 12 mit 58,3 dB, das lauteste Ereignis gab hingegen bei Starts von der Piste 29 an der Station 5 mit 86.5 dB. Die geometrischen Mittelwerte der Stationen liegen zwischen 66,0 dB an der Station 12 (25 Überflüge) und 71,9 dB an der Station 9 (88 Überflüge). Bei den Starts von der Piste 29 gab es mit 135 Messungen die meisten Lärmereignisse.

6.7 DEPARTURES 10. AUGUST 2006

Am 10. August wurde nur über die Landebahn 29 gestartet, insgesamt gab es an diesem Tag bei den Starts 142 Messungen. Das leiseste Lärmereignis gab es mit 58,3 dB an der Station 12, das lauteste mit 82,7 dB an der Station 9. Die geometrischen Mittelwerte der Stationen liegen an diesem Tag zwischen 65,1 dB an der Station 3 (5 Überflüge) und 73,0 dB an der Station 9 (76 Überflüge).

6.8 DEPARTURES 14. DEZEMBER 2006

Am 14. Dezember wurde sowohl von der Piste 11, als auch von den Pisten 16 und 29 aus gestartet. Mit 228 Messungen gab es die meisten Lärmereignisse bei Starts auf der Piste 29, gefolgt von der Landebahn 16 mit nur noch 27 Lärmereignissen. Das leiseste Lärmereignis gab es bei Starts von der Landebahn 29 an der Station 12 mit 60,3 dB, das lauteste bei Starts von der Landebahn 16 an der Station 5 mit 87,9 dB. Die geometrischen Mittelwerte der Stationen liegen zwischen 65,4 dB an der Station 13 (5 Überflüge) und 78,2 dB an der Station 5 (8 Überflüge).

ZUSAMMENFASSUNG DEPARTURES

Betrachtet man die Abbildungen 6.5 bis 6.8, so lassen sich folgende zusammenfassende Aussagen treffen:

-
- Die leisesten Lärmereignisse gab es an allen vier Tagen bei Starts von der Landebahn 29 an der Station 12 - Himberg. Mit 1220m hat diese Station auch die größte Überflugshöhe.
 - Die Station mit den lautesten Lärmereignissen war an jedem Tag eine andere, nur am 9. Jänner und am 10. August war es dieselbe - nämlich die Station 9 - Zwölfaxing. Die Tatsache, dass sich hier keine eindeutige Aussage treffen lässt, ist vermutlich auf die unterschiedliche Flugrichtung der Flugzeuge bei den Starts zurückzuführen.

7 DIE SCHALLKARTEN

Um einen Eindruck der räumlichen Verteilung des Schalls zu erhalten, wurden die Mittelwerte der Stationen mittels dem am Institut für Meteorologie und Geophysik an der Universität Wien entwickeltem Programm VERA (Vienna Enhanced Resolution Analysis) analysiert.

7.1 EINE KURZE EINFÜHRUNG IN VERA

VERA ([15], S. 11) ist ein objektives Analyseverfahren von meteorologischen Daten über einer komplexen Orografie. Die Entwicklung des Verfahrens wurde 1995 begonnen und wird seitdem ständig verbessert. Mit VERA können alle vektoriel- len und skalaren Felder wie Luftdruck, Wind, Niederschlag und Temperatur, die an unregelmäßig verteilten Stationen vorliegen mittels Interpolation auf ein regel- mäßiges Gitter gebracht werden. Das Verfahren besteht aus zwei Schritten:

- *Fehlerkorrektur*, welche die Messwerte auf ihre räumliche physikalische Konsistenz prüft
- *Interpolation* der unregelmäßig verteilten Beobachtungsdaten auf ein regel- mäßiges Gitter (dabei wird ein Ansatz verwendet, der auf den sogenannten „thin-plate-spline“ Algorithmus zurückzuführen ist).

Während eine Analyse in einer Ebene kein Problem darstellt, beeinflusst kom- plexes Gelände wie zum Beispiel die Alpen als Hindernis die Luftströmungen. Gebirgsketten beeinflussen ihre Umgebung außerdem als zusätzliche Heiz- und Kühlflächen (aus [8]). Mit Hilfe der sogenannten „*Fingerprints*“ werden die Ein- flüsse der Topographie auf das skalare bzw. vektorielle Feld eingebracht.

Als Rechenschema für VERA dient ein Variationsalgorithmus, der die Quadra- te der räumlichen ersten und/oder zweiten Ableitung des Messfeldes minimiert. Dabei wird angenommen, dass sich viele Feldverteilungen meteorologischer Pa- rameter wie Druck und Temperatur so verhalten, dass ihre Krümmung minimal ist (aus [18]).

Um von einem Gitterpunktfeld an unbekannte Gitterpunkte zu interpolierten, kann für ein eindimensionales Feld folgendes Minimierungskriterium verwendet:

$$I = \sum_i \left(\frac{\Delta \psi^2}{\Delta x^2} \Big|_i \right)^2 \rightarrow \text{Min} \quad (46)$$

Die Minimierung der Quadrate der zweiten Ableitungen des 1D-Feldes nach der räumlichen Koordinate führt zu einer Kurve mit minimaler Krümmung.

Das Analyse-Programm VERA dient prinzipiell der Analyse von meteorologischen Feldern, in diesem Fall wurde das Programm jedoch dazu verwendet um eine räumliche Verteilung des Schalls am Flughafen Wien Schwechat zu berechnen. Da dazu kein Fingerprint notwendig ist, soll auf eine ausführliche Beschreibung desselben hier verzichtet und auf andere Publikationen verwiesen werden (siehe dazu [15])

7.2 DIE ERGEBNISSE

Wie bereits oben erwähnt, sind in den Abbildungen 7.1 bis 7.8 die interpolierten Tagesmittelwerte der Stationen graphisch dargestellt. Dabei werden Stationen, an denen es Lärmereignisse gibt, schwarz eingefärbt. Stationen ohne Lärmereignisse werden nicht eingefärbt. Außerdem wurde neben den Messstationen in weiß die Anzahl der Messungen getextet. Der Flughafen Wien Schwechat ist als schwarzer Stern dargestellt, die schwarzen Balken stellen die beiden Pisten dar. Um die Abbildungen besser miteinander vergleichen zu können, wurden in rot die benutzten Flugbahnen eingezeichnet. In den Grafiken bedeutet *SID* (*Standard Instrument Departure*) die vorgegebenen Flugrouten für die Starts, während mit *ILS* (*Instrument Landing System*) die Flugrouten für die Landanflüge bezeichnet werden. Die Nummer dahinter gibt an, für welche Landebahn diese Flugoperation gilt. SID 29 steht also für einen Start von der Piste 29 aus, ILS-11 bezeichnet einen Landanflug auf die Piste 11.

Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis des 10. Jänners 2006 stellvertretend für alle 8 entstandenen Analysen:

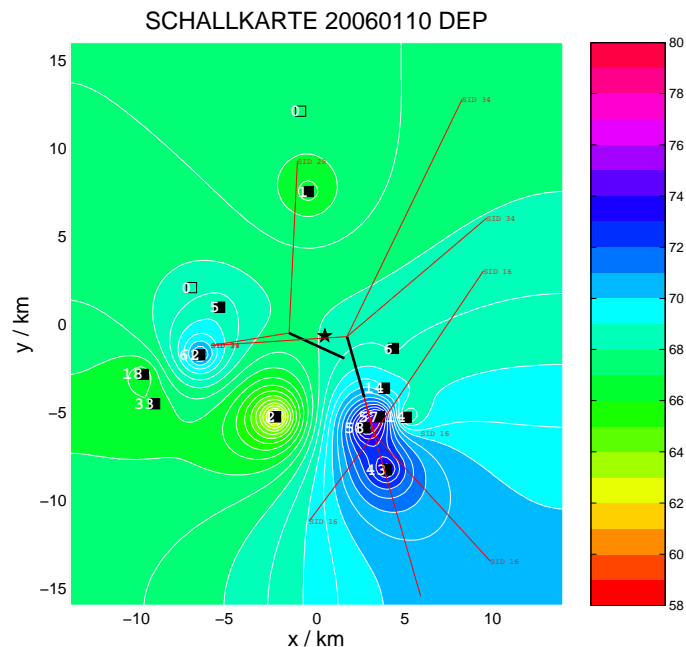


Abbildung 7.1: Schallkarte für die Landeanflüge vom 10. Jänner 2006.

Bei den Landeanflügen am 10. Jänner 2006 gab es an den Stationen 5,6 und 9 starke Pegelzentren. Die Analyse der Mittelwerte ergibt an der Station 1 einen Wert von 66 dB und an der Station 11 einen Wert von 69 dB. Diese Werte sind aber nicht möglich, da je nach Station jedes Lärmereignis einen bestimmten Wert überschreiten muss um registriert zu werden (siehe Abschnitt 4.1). Erhält eine Station ohne Messwerte nach der Analyse einen Wert, der größer als 60 dB, so ist dies eindeutig falsch. Grund dafür ist der Interpolations-Algorithmus von VERA. Wie bereits oben erwähnte (siehe Kapitel 7.1) wird bei VERA angenommen, dass sich meteorologische Parameter so verhalten, dass ihre Krümmung minimal ist. Dieser Ansatz kann für Schall nicht gemacht werden, es wurde daher beschlossen, dass jeder Station ohne registrierte Lärmereignisse den Wert von 59 dB zugewiesen wird.

In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der neuen Analyse dargestellt. Vergleicht man Abbildung 7.1 mit Abbildung 7.6, so erhält man den Eindruck, als

ob die Schallausbreitung am 10. Jänner stärker gewesen wäre als am 10. August. Dieser Eindruck täuscht jedoch, da an den verschiedenen Tagen unterschiedliche Landebahnen in Betrieb waren (man vergleiche dazu die Ergebnisse aus Kapitel 6).

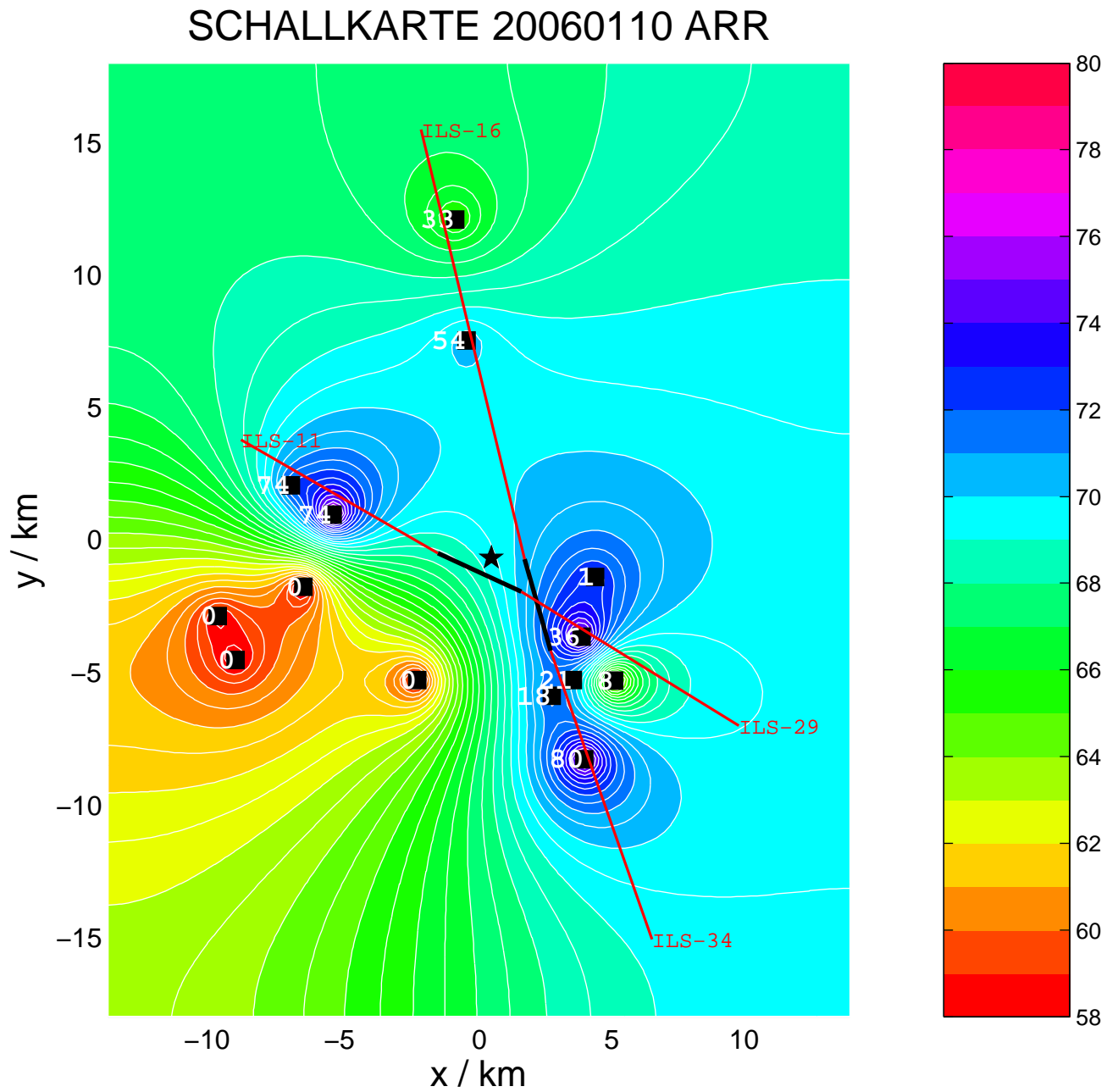


Abbildung 7.2: Schallkarte für alle registrierten Landeanflüge vom 10. Jänner 2006.

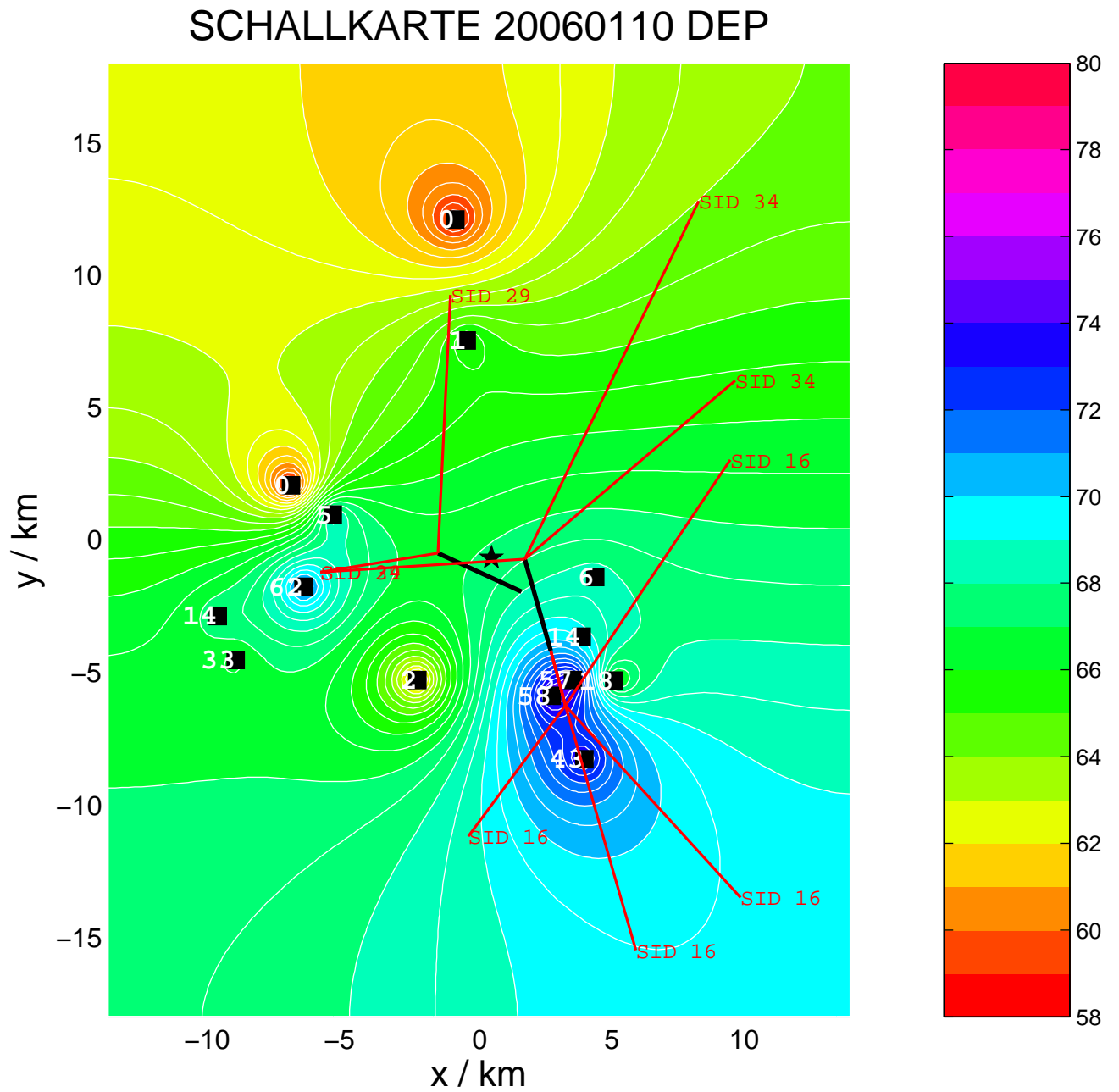


Abbildung 7.3: Schallkarte für alle registrierten Starts vom 10. Jänner 2006.

SCHALLKARTE 20060721 DEP

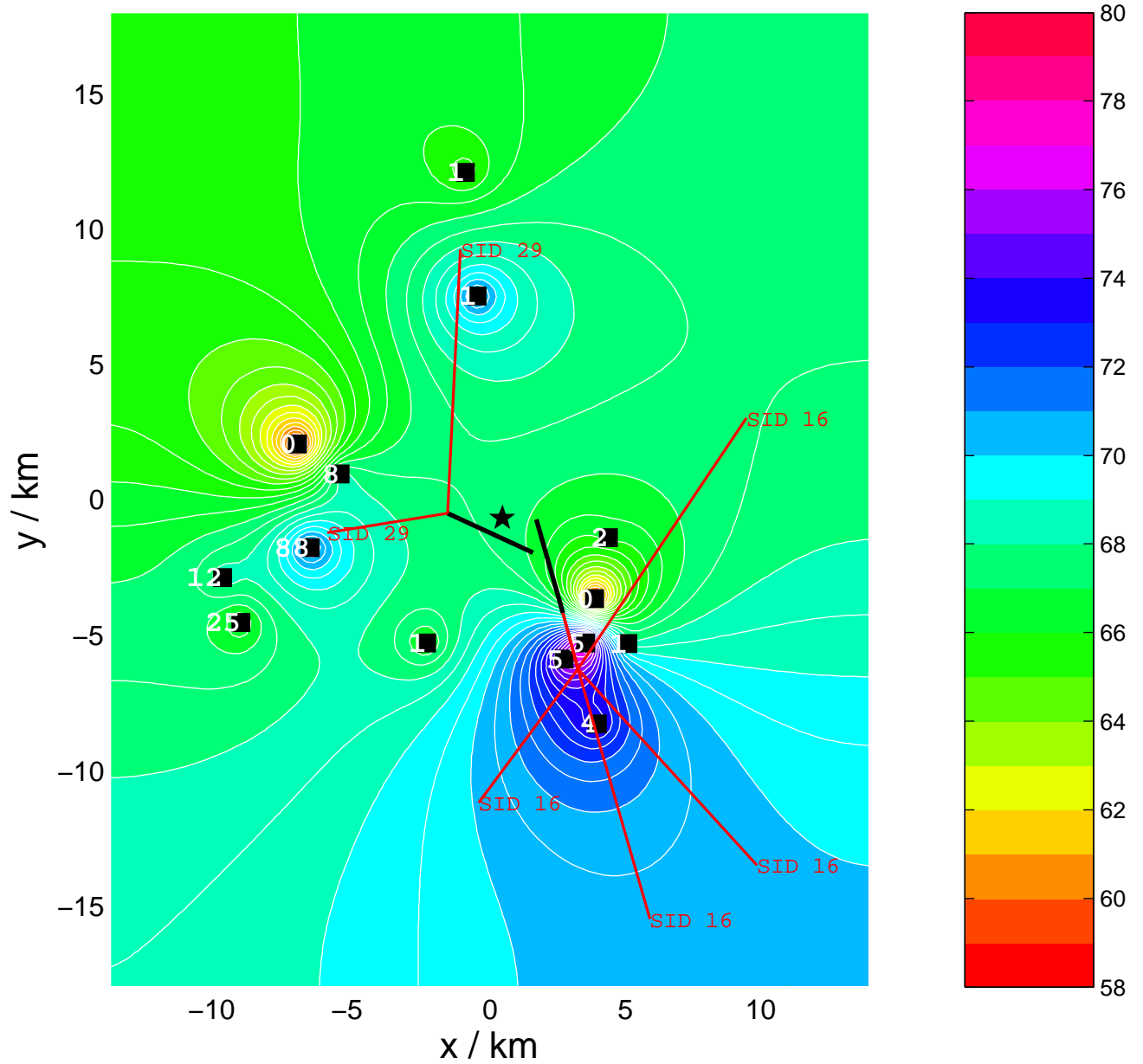


Abbildung 7.5: Schallkarte für alle registrierten Starts vom 21. Juli 2006.

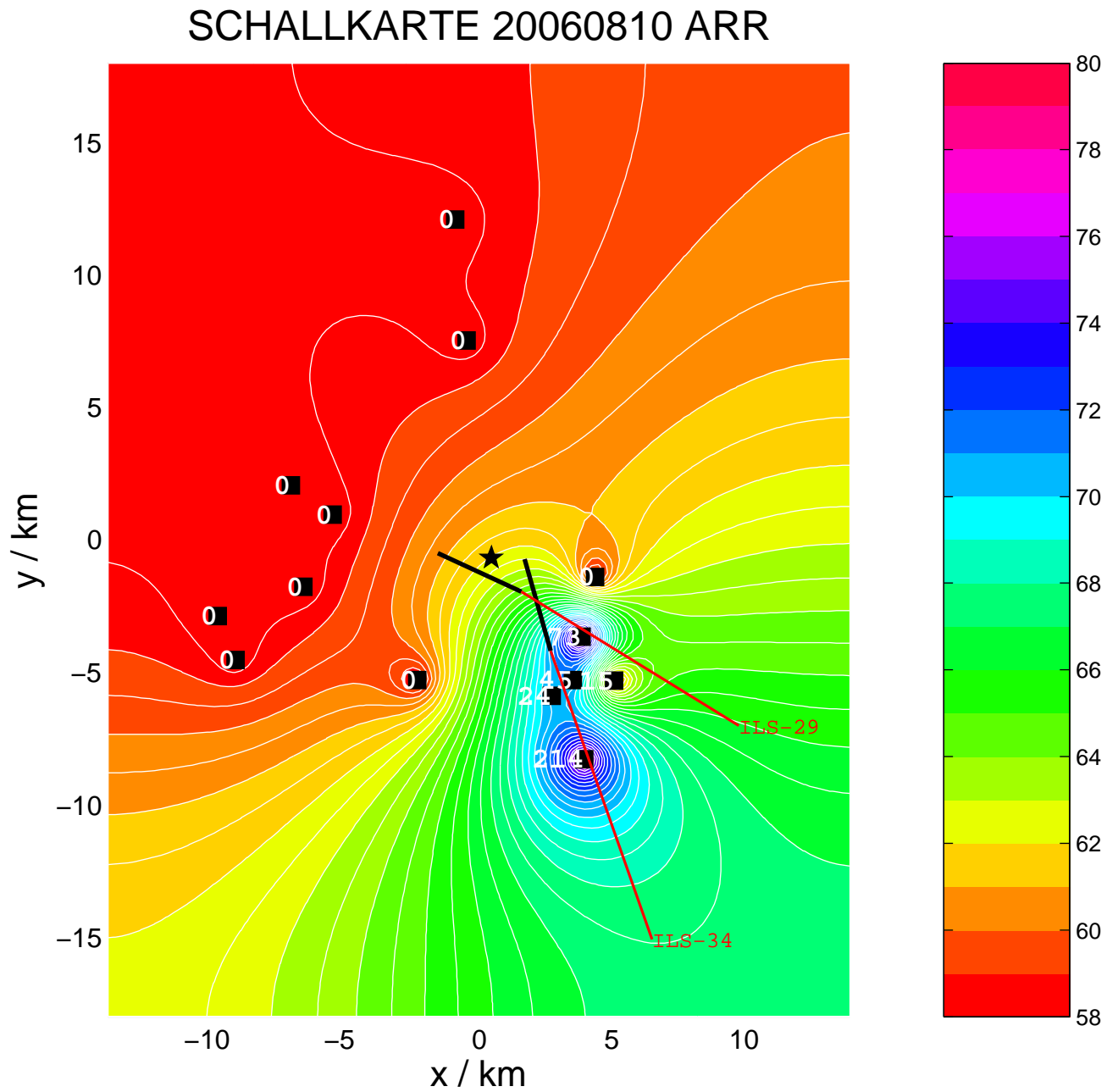


Abbildung 7.6: Schallkarte für alle registrierten Landeanflüge vom 10. August 2006.

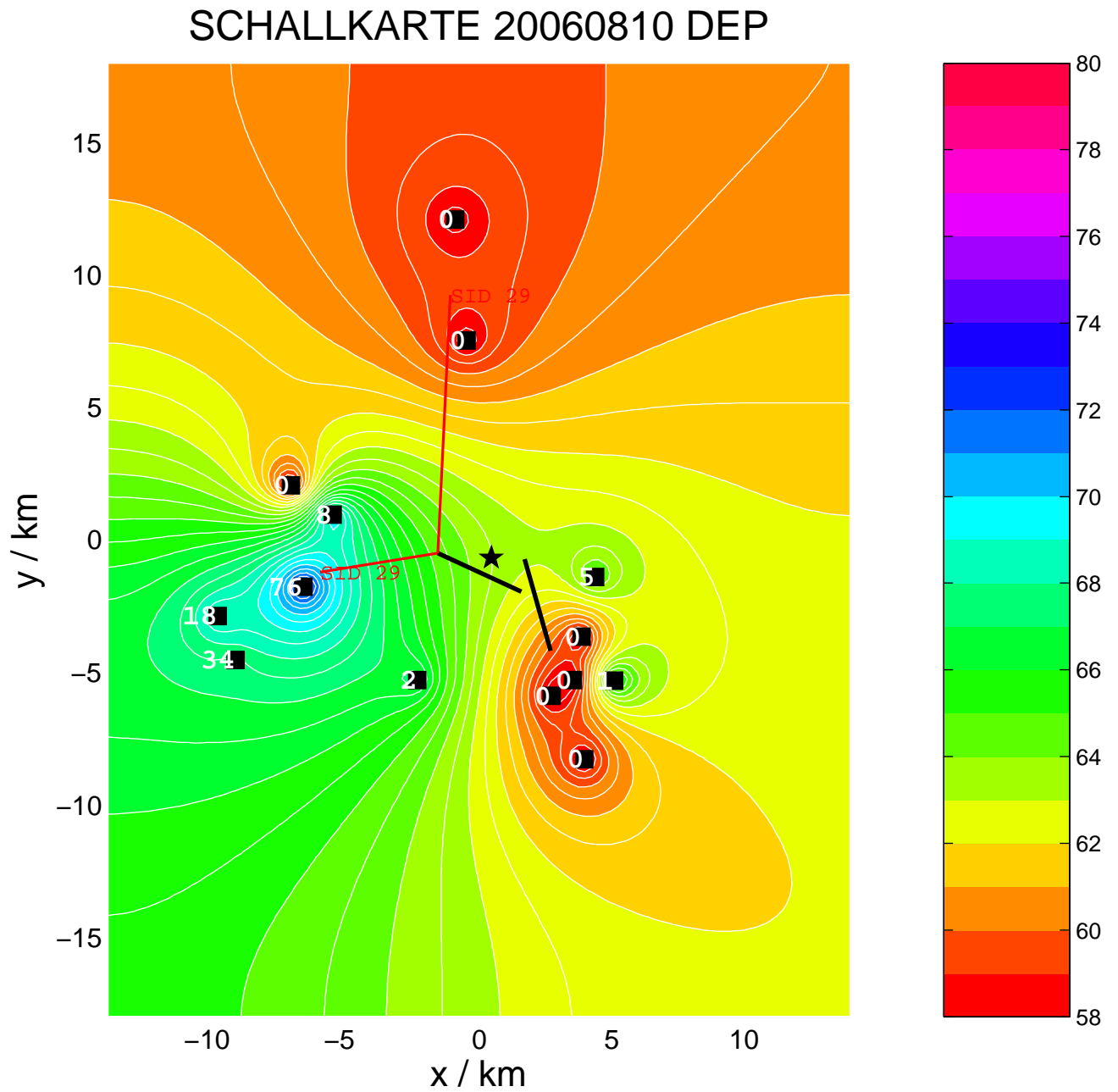


Abbildung 7.7: Schallkarte für alle registrierten Starts vom 10. August 2006.

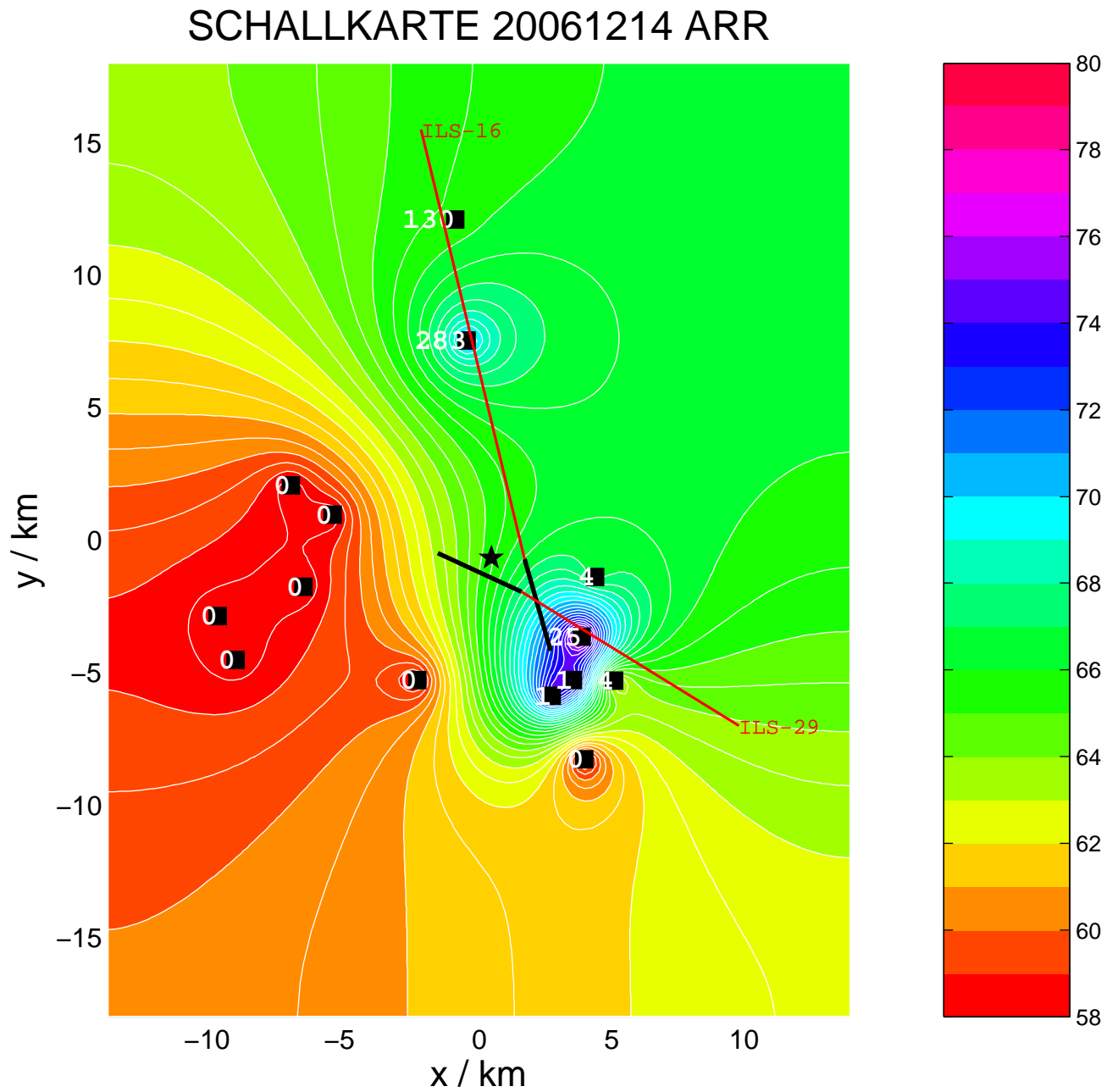


Abbildung 7.8: Schallkarte für alle registrierten Landeanflüge vom 14. Dezember 2006.

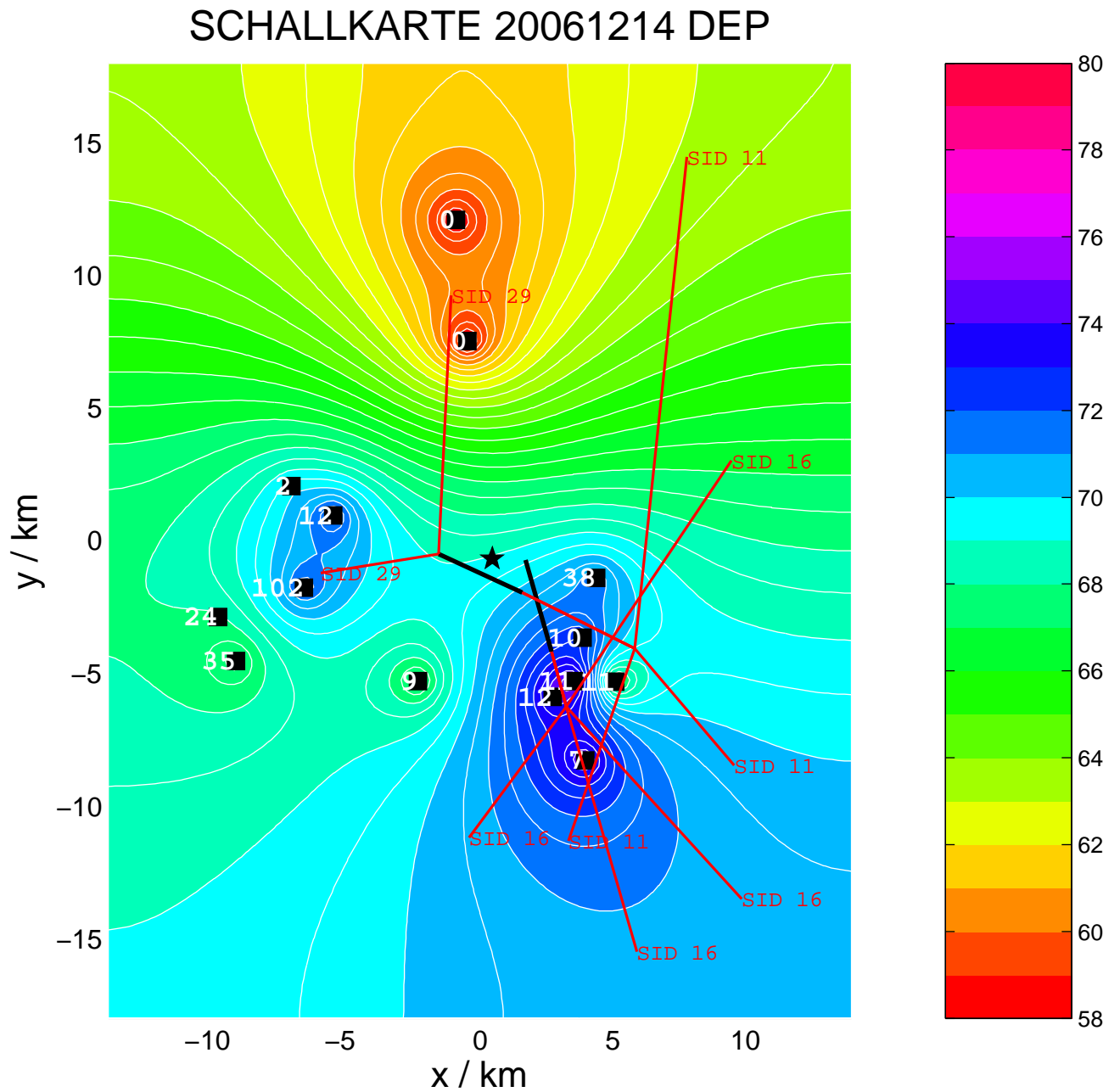


Abbildung 7.9: Schallkarte für alle registrierten Starts vom 14. Dezember 2006.

7.2.1 Schallkarte der registrierten Landeanflüge vom 10. Jänner 2006

Am 10. Jänner wurden, wie bereits oben erwähnt, alle vier Landebahnen angefliegen. Dies zeigt sich auch in der Schallkarte wieder: So sind die Stationen 2, 4, 7, 10 und 11 Pegelzentren. Doch auch die Stationen 1, 5, 6 und 13 registrierten an diesem Tag Überflüge. Dies ist nicht weiter verwunderlich, wenn man die Landeanflugsbahnen berücksichtigt. So werden bei Landenanflügen auf die Piste 11 die Stationen 10 - Schwechat und 11 - Wien Simmering nahezu direkt überflogen. Bei Anflügen auf die Landebahn 16 geschieht dies mit den Stationen 1 - Wien-Essling und 2 - Groß-Enzersdorf. Auch die Tatsache, dass die Station 1 niedrigere Pegelwerte und weniger registrierte Überflüge hat als die Station 2 läßt sich auf Grund der geringeren Überflughöhe von Groß-Enzerdorf leicht erklären. Auch die hohen Pegelwerte der Station 4 - Klein-Neusiedl verwundern nicht, da diese Station bei Anflügen auf die Piste 29 nahezu direkt überflogen wird. Ebenso kann man die hohen Pegelwerte der Station 7 - Margarethen/ Moos mit den Anflügen auf die Piste 34 erklären. Auffällig ist dabei, dass die Station 5 - Enzersdorf/ Fische und die Station 6 - Schwadorf geringere Pegelwerte und weniger registrierte Überflüge aufweisen, also die Station 7 obwohl diese beiden Stationen eine niedrigere Überflughöhe und einen näheren Standort beim Flughafen aufweisen, als die Station 7. Die Gründe dafür können nur vermutet werden, auf sie wird bei der Zusammenfassung weiter unten eingegangen.

7.2.2 Schallkarte der registrierten Starts vom 10. Jänner 2006

Prinzipiell sind Starts komplexer als Landeanflüge. Dies liegt daran, dass bei den Landeanflügen die Flugzeuge mittels ILS (Instrument Landing System) meist genau auf der vorgegebenen Flugroute fliegen. Bei den Starts hängt die Flugrichtung allerdings sehr rasch vom Ziel ab, man kann dies auch anhand der rot eingezeichneten Flugbahnen an den Schallkarten erkennen.

Am 10. Jänner erfolgten Starts von der Piste 16, 29 und 34 aus. Pegelzentren sind an diesem Tag die Station 9 - Zwölfaxing und die Stationen 5 - Enzersdorf/ Fische und 6 - Schwadorf. Die Tatsache, dass an der Station 9 hohe Pegelwerte

und die meisten registrierten Überflüge zu finden sich, läßt sich dadurch erklären, dass die Flugzeuge bei Starts rasch an Höhe gewinnen. Die Überflugshöhe an den umliegenden Stationen dürfte schon deutlich höher gewesen sein als an der Station 9 - dies würde auch die niedrigeren registerten Überflüge erklären. Auffällig ist hier, dass die Stationen 5 und 6, welche näher am Flughafen liegen als die Station 7, höhere Messwerte und auch eine höhere Anzahl von registrierten Überflügen haben als diese.

7.2.3 Schallkarte der registrierten Landeanflüge vom 21. Juli 2006

Am 21. Juli wurden die Landebahnen 16, 29 und 34 angefliegen. Die zeigt sich ebenfalls wieder in der Schallkarte wieder. Wie bereits am 10. Jänner gibt es an den Stationen 2, 4 und 7 hohe Pegelzentren. Diese Pegelzentren lassen sich sofort wieder mit den vorgegebenen Flugbahnen erklären. Auch hier haben die Stationen 5 und 6, wie bereits am 10. Jänner, niedrigere Werte als die Station 7. Da an diesem Tag nicht auf der Piste 11 gelandet wurde, sind für die Stationen 9, 10, 11, 12 und 15 keine Messwerte zu erhalten, was auch bestätigt wird.

7.2.4 Schallkarte der registrierten Starts vom 21. Juli 2006

Am 21. Juli wurden von den Piste 16 und 29 aus gestartet. Wie am 10. Jänner verursacht das Starten von der Landebahn 29 aus ein Pegelzentrum an der Station 9 und das Starten von der Landebahn 29 aus ein Zentrum an den Stationen 5 und 6. Es gibt keinen auffälligen Unterschied zwischen der Schallkarte von den registrierten Starts vom 21. Juli zu der Schallkarte der registrierten Starts vom 10. Jänner.

7.2.5 Schallkarte der registrierten Landeanflüge vom 10. August 2006

Am 10. August wurde nur auf der Piste 29 und 34 gelandet. Dem entsprechend sind starke Pegelzentren an den Stationen 4 (Überflüge bei Landungen auf die Piste 29) und 7 (Überflüge bei Landungen auf die Piste 34) zu finden. Auch hier

haben die Stationen 5 und 6 wieder niedrigere Werte und weniger registrierte Überflüge als die Station 7. Da an diesem Tag die Landebahnen 11 und 16 nicht angeflogen wurden, gibt es für die Stationen 1, 2, 9, 10, 11, 12, 15 keine Messwerte.

7.2.6 Schallkarte der registrierten Starts vom 10. August 2006

An diesem Tag wurde nur von der Landebahn 29 aus gestartet, dadurch gibt es wie am 10. Jänner und am 21. Juli ein Pegelzentrum an der Station 9. Auffällig sind an diesem Tag jedoch die fünf registrierten Überflüge bei Starts an der Station 5 und ein registrierter Überflug bei Starts an der Station 13. Die Ursache für diese Messungen können mit dem zur Verfügung stehenden Datenmaterial nicht erklärt werden.

7.2.7 Schallkarte der registrierten Landeanflüge vom 14. Dezember 2006

An diesem Tag wurde auf den Pisten 16 und 29 gelandet. Auch hier zeigt sich diese Tatsache in der Schallkarte wieder. So sind an diesem Tag die Stationen 2 und 4 die Pegelzentren, während es an der Station 7 und an den Stationen 9, 10, 11, 12 und 15 keine Messwerte gibt. Auffällig sind die hohen Pegelwerte an den Stationen 5 und 6. Da diese Werte allerdings aus je nur einem Messwert entstehen, sind diese mit Vorsicht zu behandeln.

7.2.8 Schallkarte der registrierten Starts vom 14. Dezember 2006

Die Schallkarte der registrierten Überflüge vom 14. Dezember bringt keine neuen Erkenntnisse. An diesem Tag wurde von den Pisten 11, 16 und 29 aus gestartet. Ein Pegelzentrum befindet an der Station 9, wie an den anderen Tagen, an denen von der Landebahn 29 aus gestartet wurde. Weitere Zentren sind an den Stationen 5 und 6 zu finden. Auch hier hat die Station 7 weniger registrierte Überflüge als jene, was sich leicht erklären läßt (siehe Schallkarte der registrierten Starts vom 10. Jänner 2006).

7.2.9 Zusammenfassung

Auffällig ist, dass bis auf den 14. Dezember immer die Stationen 7 und 4, also Margarethen/ Moos und Klein-Neusiedl Pegelzentren sind. Diese Tatsache lässt sich dadurch erklären, dass die Station 7 bei Landeanflügen auf die Piste 34 und die Station 4 bei Landeanflügen auf die Piste 29 nahezu direkt überflogen werden dürften. Die Stationen 5 (Enzersdorf/ Fischa) und 6 (Schwadorf), welche sich in der Nähe der Station 7 und 4 befinden, werden ebenfalls bei Landungen auf der Piste 34 überflogen, doch sie haben niedrigere Mittelwerte. Dies verwundert, da ihre Distanz zum Flughafen kürzer und ihre Überflughöhe deutlich niedriger als die der Station 7 ist. Die Gründe dafür lassen sich nur vermuten. Es ist möglich, dass die Messgeräte ungünstig positioniert sind (zum Beispiel in der Nähe von Hauswänden oder in Senken) und dadurch die Messungen verfälscht werden. Eine andere mögliche Erklärung bieten die Flugstrecken: während die Stationen 4 und 7, wie bereits erwähnt, nahezu direkt überflogen werden, werden die Stationen 5 und 6 möglicherweise nur seitlich überflogen. In Folge dessen sind die Schallpegelwerte dort niedriger.

Unterschiede zwischen Sommer- und Wintertagen konnten in diesem Datensatz nicht festgestellt werden.

7.3 DER U-TEST

Um eine Aussage über signifikante Unterschiede zwischen den Tagesmittelwerten der einzelnen Stationen treffen zu können, sollen die empirischen Mittelwerte auf zufällige beziehungsweise signifikante Unterschiede hin geprüft werden. Da die Stichproben in diesem Fall nicht normalverteilt sind, wurde diese Prüfung mit dem U-Test (Rangordnungstest) durchgeführt, wobei die beiden Stichproben nicht gleich groß sein müssen. Beispielhaft sei hier das Histogramm der Station 7 - Margarethen/ Moos für die Landeanflüge am 10. August herausgegriffen:

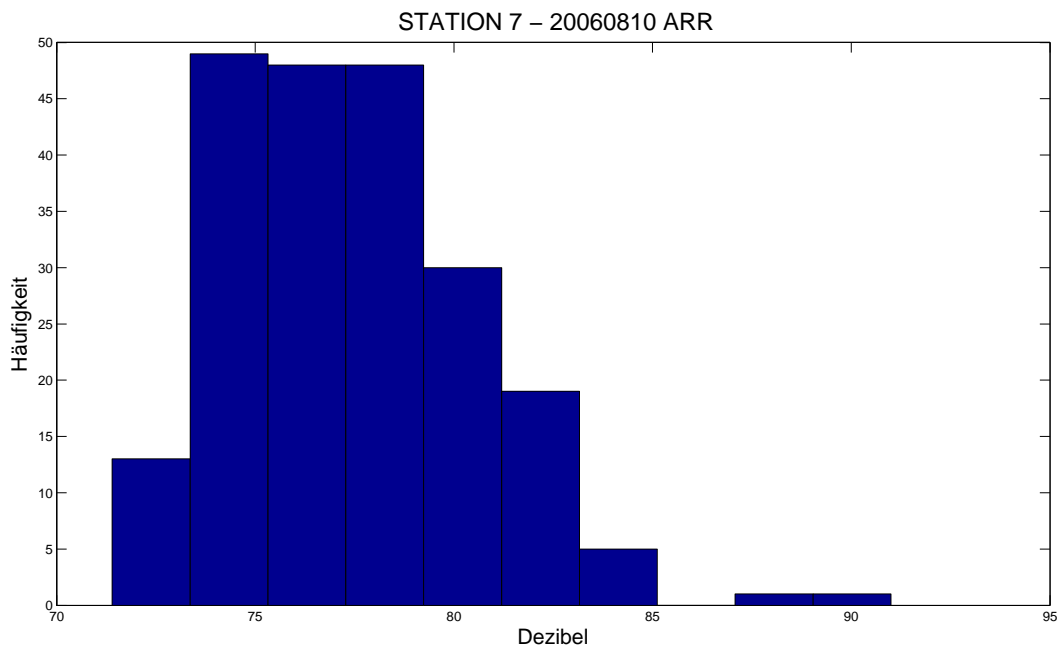


Abbildung 7.10: Histogramm der Station 7 - Margarethen/ Moos. Dargestellt sind alle registrierten Messwerte der Landeanflüge vom 10. August 2006.

Die Prüfgröße \hat{z} wird wie folgt berechnet (aus [13]):

$$U_1 = n_a \cdot n_b + \frac{n_a(n_a + 1)}{2} - R_a \quad U_2 = n_a \cdot n_b + \frac{n_b(n_b + 1)}{2} - R_b \quad (47)$$

$$U = \text{Min}(U_1, U_2) \quad (48)$$

$$\hat{z} = \frac{|U - \frac{n_a n_b}{2}|}{\sqrt{\frac{n_a n_b (n_a + n_b + 1)}{12}}} \quad (49)$$

Wobei n_a und n_b die Umfänge und U_1 , U_2 und U Hilfsgrößen sind, welche zur Durchführung des z-Tests benötigt werden. Da es sich beim U-Test um einen sogenannten Rangtest handelt, müssen die Daten in Rangordnung gebracht werden. R_1 und R_2 sind die Rangzahlen der geordneten Reihen. Diese werden für die beiden Stichproben n_a und n_b getrennt in zwei Spalten aufsummiert. Sind zwei oder

mehrere Werte in beiden Datensätzen gleich, dann müssen in beiden Rangspalten jeweils die Mediane (bzw. arithmetischen Mittel) eingetragen werden. Der U-Test kann sowohl einseitig als auch zweiseitig durchgeführt werden:

- *einseitiger U-Test*: Prüfung, ob $n_a > n_b$ oder ob $n_b > n_a$
- *zweiseitiger U-Test*: Prüfung, ob $n_a = n_b$

Die Nullhypothese besagt, dass es keinen Unterschied zwischen den beiden Stichproben n_a und n_b gibt, also $n_a = n_b$ gilt.

$$H_0 \text{ wird abgelehnt : } \begin{cases} \text{einseitiger Test : } U_1 > U \text{ bzw. } U_2 > U \\ \text{zweiseitiger Test : } \min(U) < U \end{cases} \quad (50)$$

Es gibt Tabellen, aus denen man in Abhängigkeit von n_a und n_b den kritischen U-Wert entnehmen kann. Als Beispiel sei hier Schönwiese (siehe [13]) genannt.

Um die einzelnen Stichproben sinnvoll miteinander zu vergleichen, wird ein U-Test nur unter folgenden Bedingungen gerechnet:

- *Es werden die Mittelwerte der einzelnen Stationen nur mit sich selbst verglichen*
Beispiel: Es werden, wenn es an beiden Tagen Messwerte vorhanden sind, die Messwerte der Station 1 am 10. Jänner 2006 mit den Messwerten der Station 1 am 21. Juli 2006 verglichen, nicht allerdings die Messwerte der Station 1 am 10. Jänner 2006 mit Messwerten der Station 2 am 21. Juli 2006 usw.
- *Es werden nur Landeanflüge mit Landeanflügen und Starts mit Starts verglichen*
Beispiel: Es werden Messwerte von Landeanflügen der Station 1 vom 10. Jänner 2006 mit Messwerten von Landeanflügen der Station 1 am 21. Juli 2006 miteinander verglichen, nicht aber Messwerte von Landeanflügen der Station 1 vom 10. Jänner 2006 mit Messwerten vom Starts der Station 1 am 21. Juli 2006 usw.

- *Es muss in derselben Pistenrichtung gelandet bzw. gestartet werden*

Beispiel: Es werden Messwerte von Landeanflügen auf die Piste 11 der Station 1 am 10. Jänner 2006 mit Messwerten von Landeanflügen auf die Piste 11 der Station 1 am 21. Juli 2006 miteinander verglichen, nicht aber Messwerte von Landeanflügen auf die Piste 11 der Station 1 am 10. Jänner 2006 mit Messwerten von Landeanflügen auf die Piste 29 der Station 1 am 21. Juli 2006.

Werden diese Voraussetzungen erfüllt, so wird ein U-Test gerechnet. Der Test wurde in Matlab mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ durchgeführt. Wird kein signifikanter Unterschied festgestellt, so erhält man den Wahrheitswert 0. Die Nullhypothese ist abzulehnen, es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Stichproben. Ist die Nullhypothese abzulehnen (also ein signifikanter Unterschied feststellbar), so erhält man den Wahrheitswert 1. Die Ergebnisse sind in der folgenden Grafik abgebildet. Jene Tests, welche einen Wahrheitswert von 1 ergeben haben sind in den beiden Tabelle als roter Text dargestellt. In der ersten Spalte steht die Nummer der Landebahn, die zweite Spalte beinhaltet die Information über Flugoperation der Flugzeuge (Arrivals oder Departures). In der dritten und vierten Spalte steht das Datum der Tage, die miteinander verglichen wurden. Die fünfte Spalte beinhaltet die Nummer der Station und die sechste Spalte schließlich das Ergebnis des U-Tests, also den Wahrheitswert 0 oder 1.

- Beispiel 1: Der 1. gerechnete U-Test

Der erste gerechnete U-Test steht in der ersten Zeile der linken Tabelle. Es wurden die Messwerte der Station 1 bei Landeanflügen auf die Piste 16 am 10. Jänner 2006 mit Messwerten der Station 1 bei Landeanflügen auf die Piste 16 am 21. Juli 2006 miteinander verglichen. Ergebnis des U-Test ist in diesem Fall der Wahrheitswert 0 - also eine Annahme der Nullhypothese.

- Beispiel 2: Der 46. gerechnete U-Test

Der 46. gerechnete U-Test steht in der neunten Zeile der rechten Tabelle. Es wurden die Messwerte der Station 9 bei Starts von der Piste 29 am 10. Jänner 2006 mit Messwerten der Station 9 bei Starts von der Piste 29 am 10. August miteinander verglichen. In diesem Fall ist das Ergebnis des U-Tests

der Wahrheitswert 1, was zu einer Ablehnung der Nullhypothese führt. Er ist daher auch in roter Schrift dargestellt.

| RWY | ROUTE | TAG | TAG | STATION | H |
|-----|-------|------|------|---------|---|
| 16 | ARR | 0110 | 0721 | 1 | 0 |
| 16 | ARR | 0110 | 0721 | 2 | 0 |
| 16 | ARR | 0110 | 1214 | 1 | 0 |
| 16 | ARR | 0110 | 1214 | 2 | 0 |
| 16 | ARR | 0721 | 1214 | 1 | 0 |
| 16 | ARR | 0721 | 1214 | 2 | 1 |
| 29 | ARR | 0110 | 0721 | 4 | 1 |
| 29 | ARR | 0110 | 0721 | 13 | 0 |
| 29 | ARR | 0110 | 0810 | 4 | 1 |
| 29 | ARR | 0110 | 0810 | 13 | 0 |
| 29 | ARR | 0110 | 1214 | 4 | 0 |
| 29 | ARR | 0110 | 1214 | 13 | 0 |
| 29 | ARR | 0721 | 0810 | 4 | 0 |
| 29 | ARR | 0721 | 0810 | 13 | 0 |
| 29 | ARR | 0721 | 1214 | 4 | 0 |
| 29 | ARR | 0721 | 1214 | 13 | 0 |
| 29 | ARR | 810 | 1214 | 4 | 0 |
| 29 | ARR | 810 | 1214 | 13 | 0 |
| 34 | ARR | 0110 | 0721 | 5 | 0 |
| 34 | ARR | 0110 | 0721 | 6 | 1 |
| 34 | ARR | 0110 | 0721 | 7 | 1 |
| 34 | ARR | 0110 | 0810 | 5 | 0 |
| 34 | ARR | 0110 | 0810 | 6 | 0 |
| 34 | ARR | 0110 | 0810 | 7 | 1 |
| 34 | ARR | 0721 | 0810 | 5 | 0 |
| 34 | ARR | 0721 | 0810 | 6 | 0 |
| 34 | ARR | 0721 | 0810 | 7 | 0 |
| 16 | DEP | 0110 | 0721 | 5 | 0 |
| 16 | DEP | 0110 | 0721 | 6 | 0 |
| 16 | DEP | 0110 | 0721 | 7 | 0 |
| 16 | DEP | 0110 | 1214 | 4 | 0 |
| 16 | DEP | 0110 | 1214 | 5 | 0 |
| 16 | DEP | 0110 | 1214 | 6 | 0 |
| 16 | DEP | 0110 | 1214 | 7 | 0 |
| 16 | DEP | 0110 | 1214 | 13 | 0 |
| 16 | DEP | 0721 | 1214 | 5 | 0 |
| 16 | DEP | 0721 | 1214 | 6 | 0 |

| RWY | ROUTE | TAG | TAG | STATION | H |
|-----|-------|------|------|---------|---|
| 16 | DEP | 0721 | 1214 | 7 | 0 |
| 29 | DEP | 0110 | 0721 | 3 | 0 |
| 29 | DEP | 0110 | 0721 | 9 | 0 |
| 29 | DEP | 0110 | 0721 | 10 | 0 |
| 29 | DEP | 0110 | 0721 | 12 | 0 |
| 29 | DEP | 0110 | 0721 | 15 | 0 |
| 29 | DEP | 0110 | 0810 | 3 | 0 |
| 29 | DEP | 0110 | 0810 | 8 | 0 |
| 29 | DEP | 0110 | 0810 | 9 | 1 |
| 29 | DEP | 0110 | 0810 | 10 | 0 |
| 29 | DEP | 0110 | 0810 | 12 | 0 |
| 29 | DEP | 0110 | 0810 | 15 | 0 |
| 29 | DEP | 0110 | 1214 | 3 | 1 |
| 29 | DEP | 0110 | 1214 | 5 | 0 |
| 29 | DEP | 0110 | 1214 | 6 | 0 |
| 29 | DEP | 0110 | 1214 | 8 | 0 |
| 29 | DEP | 0110 | 1214 | 9 | 0 |
| 29 | DEP | 0110 | 1214 | 10 | 0 |
| 29 | DEP | 0110 | 1214 | 12 | 0 |
| 29 | DEP | 0110 | 1214 | 15 | 0 |
| 29 | DEP | 0110 | 1214 | 13 | 0 |
| 29 | DEP | 0721 | 0810 | 3 | 0 |
| 29 | DEP | 0721 | 0810 | 9 | 0 |
| 29 | DEP | 0721 | 0810 | 10 | 0 |
| 29 | DEP | 0721 | 0810 | 12 | 0 |
| 29 | DEP | 0721 | 0810 | 15 | 0 |
| 29 | DEP | 0721 | 1214 | 3 | 1 |
| 29 | DEP | 0721 | 1214 | 9 | 0 |
| 29 | DEP | 0721 | 1214 | 10 | 1 |
| 29 | DEP | 0721 | 1214 | 12 | 0 |
| 29 | DEP | 0721 | 1214 | 15 | 0 |
| 29 | DEP | 0810 | 1214 | 3 | 1 |
| 29 | DEP | 0810 | 1214 | 8 | 0 |
| 29 | DEP | 0810 | 1214 | 9 | 1 |
| 29 | DEP | 0810 | 1214 | 10 | 0 |
| 29 | DEP | 0810 | 1214 | 12 | 0 |
| 29 | DEP | 0810 | 1214 | 15 | 1 |

Da nicht an jedem Tag, zu jeder Flugoperation an jeder Station Messdaten vorhanden sind wurden insgesamt 74 U-Tests gerechnet. Aus diesem Grund war es nicht möglich, für die Piste 11 auch nur einen einzigen Test zu rechnen: denn Landeanflüge auf die Piste 11 gab es nur am 10. Jänner und nur am 14. Dezember wurde von der Landebahn 11 aus gestartet. Sowohl für Landeanflüge als auch für Starts von der Landebahn 11 gibt es somit keine Vergleichswerte.

Von den insgesamt 74 gerechneten U-Test wurde 61 mal der Wahrheitswert 0 und 13 mal der Wahrheitswert 1 errechnet. Es läßt sich somit keine eindeutige Aussage über mögliche signifikante Unterschiede zwischen den Stichproben treffen. Tendenziell kann man eher davon ausgehen, dass es keinen Unterschied zwischen den unterschiedlichen Stichproben gibt.

7.4 DER BOX-WHISKER-PLOT

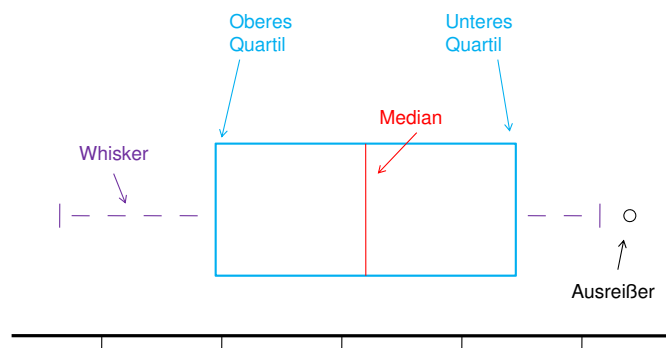


Abbildung 7.12: Der Box-Whisker-Plot

Der Box-Whisker-Plot (kurz: Box-Plot) dient zur graphischen Darstellung der zentralen Tendenz, Streuung und Schiefe sowie möglicher Ausreißer. Die Box wird durch das obere und untere Quartil begrenzt, 50 % der Daten befinden sich innerhalb der Box. Durch die Länge der Box kann der Interquartilsabstand abgelesen werden. Als weiteres Quartil ist der Median in der Box eingezeichnet, wel-

cher durch seine Lage innerhalb der Box einen Eindruck von der Schiefe der den Daten zugrunde liegenden Verteilung vermittelt. Die vertikalen Linien werden als „Whisker“ bezeichnet. Die Länge der Whisker wird durch die Daten bestimmt, sie beträgt maximal das 1,5-fache des Interquartilsabstandes. Ausreißer, die zwischen $1,5 \times \text{IQR}$ und $3 \times \text{IQR}$ liegen als schwache Ausreißer bezeichnet. Werte, die über $3 \times \text{IQR}$ liegen werden als extreme Ausreißer bezeichnet. Diese werden auch unterschiedlich im Diagramm gekennzeichnet. Gibt es keine Daten, die außerhalb der Whisker liegen, so werden diese durch den Maximal- und Minimalwert begrenzt ([23]).

Wie bereits erwähnt ergaben hatten 13 U-Tests einen Wahrheitswert 1 als Ergebnis, was eine Verwerfung der Nullhypothese zur Folge hat. Dieses Ergebnis müsste sich auch graphisch in den Boxplots zeigen. Daher wurden alle 13 U-Tests mit einem Wahrheitswert 1 als Ergebnis als Boxplots dargestellt. In der folgenden Abbildung sind die Boxplots der Station 4 bei Anflügen auf die Landebahn 29 vom 10. Jänner und vom 21. Juni abgebildet:

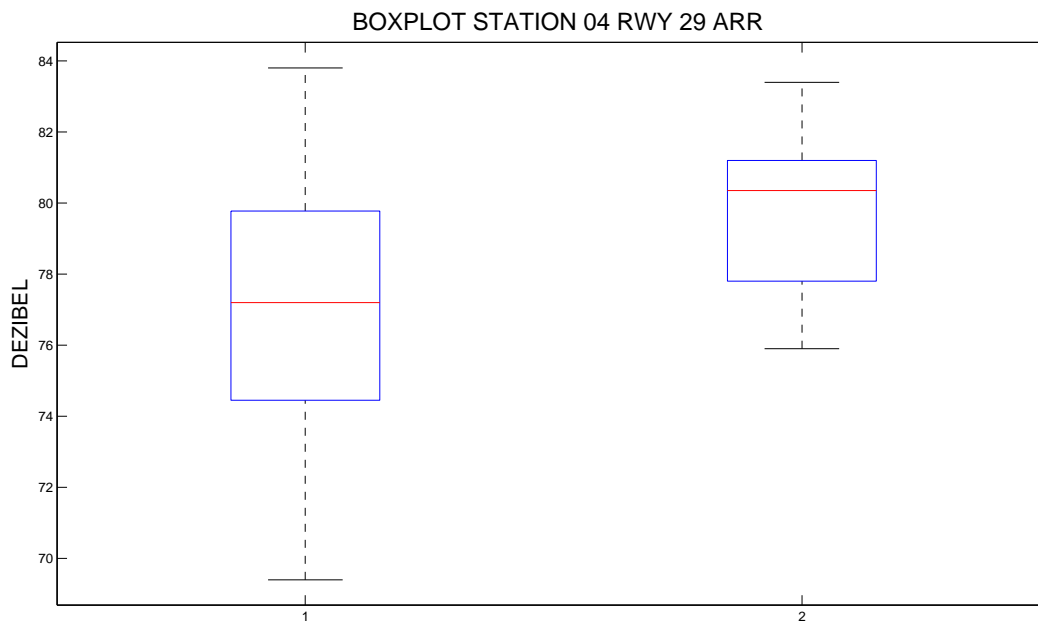


Abbildung 7.12: Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 4 - Klein-Neusiedl für Landeanflüge auf die Piste 29 am 10. Jänner 2006 (links) und am 21. Juli 2006 (rechts). Der Stichprobenumfang beträgt am 10. Jänner 35 Messungen und am 21. Juli 18 Messungen.

Leider ist dies nicht der Fall. Grund dafür sind die oft starken unterschiedlichen Stichprobenumfänge und die starke Streuung der Daten. Da die Boxplots für alle positiven U-Tests mehr oder weniger gleich aussehen, wird auf weitere Abbildungen hier verzichtet. Sie sind zur Vervollständigung der Arbeit jedoch im Bildanhang zu finden.

7.5 VERGLEICH SOMMER-WINTER

Um die eingangs gestellte Frage, ob es im Sommer lauter ist als im Winter, beantworten zu können, wurden in einem weiteren Schritt Stationsmittelwerte über die beiden Sommer- und Wintertage berechnet und anschließend eine Analyse gerechnet. Die Ergebnisse sind in den folgenden vier Abbildungen dargestellt:

SCHALLKARTE WINTER ARR

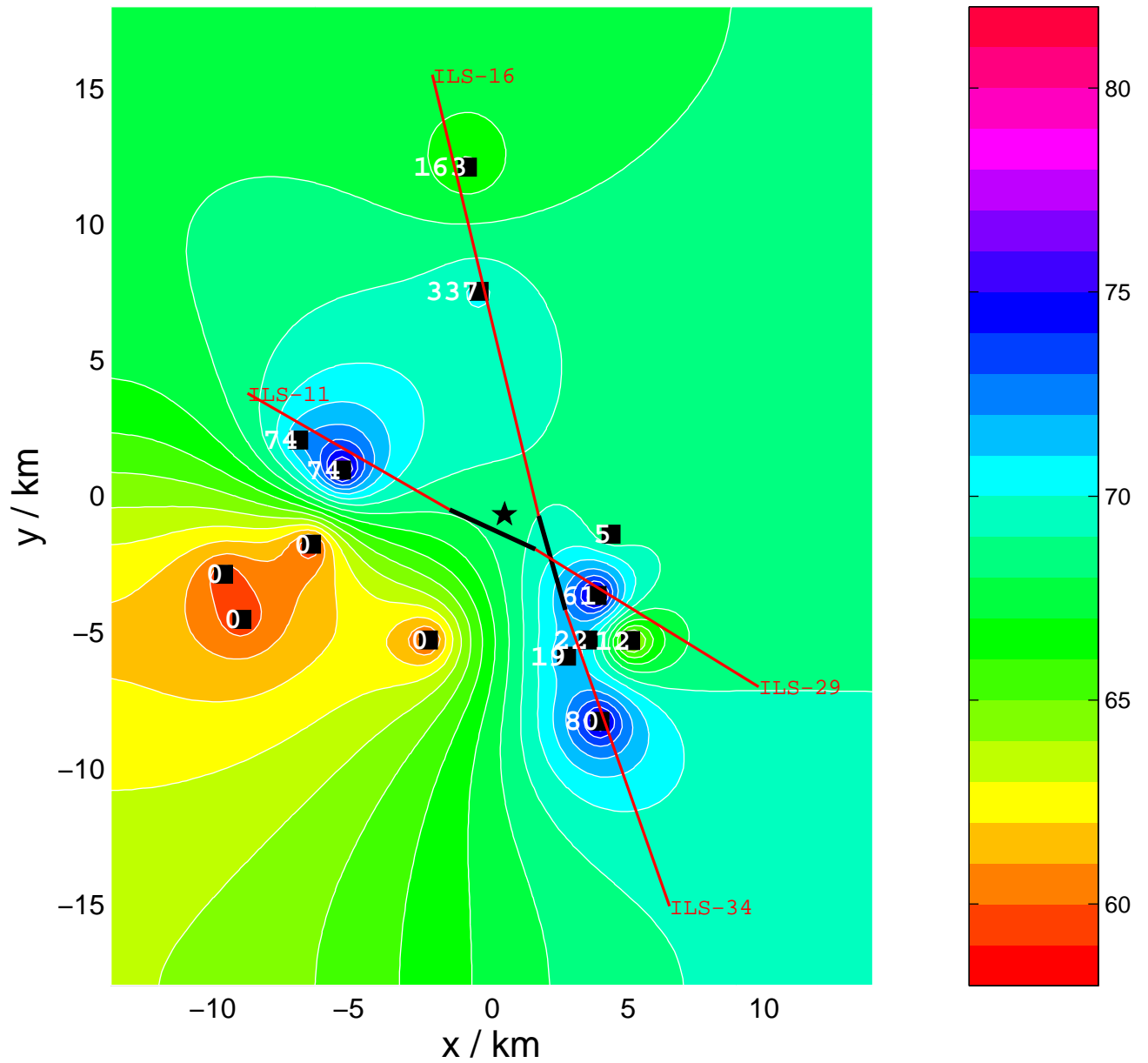


Abbildung 7.13: Schallkarte für alle registrierten Landeanflüge an den beiden Wintertagen.

SCHALLKARTE SOMMER ARR

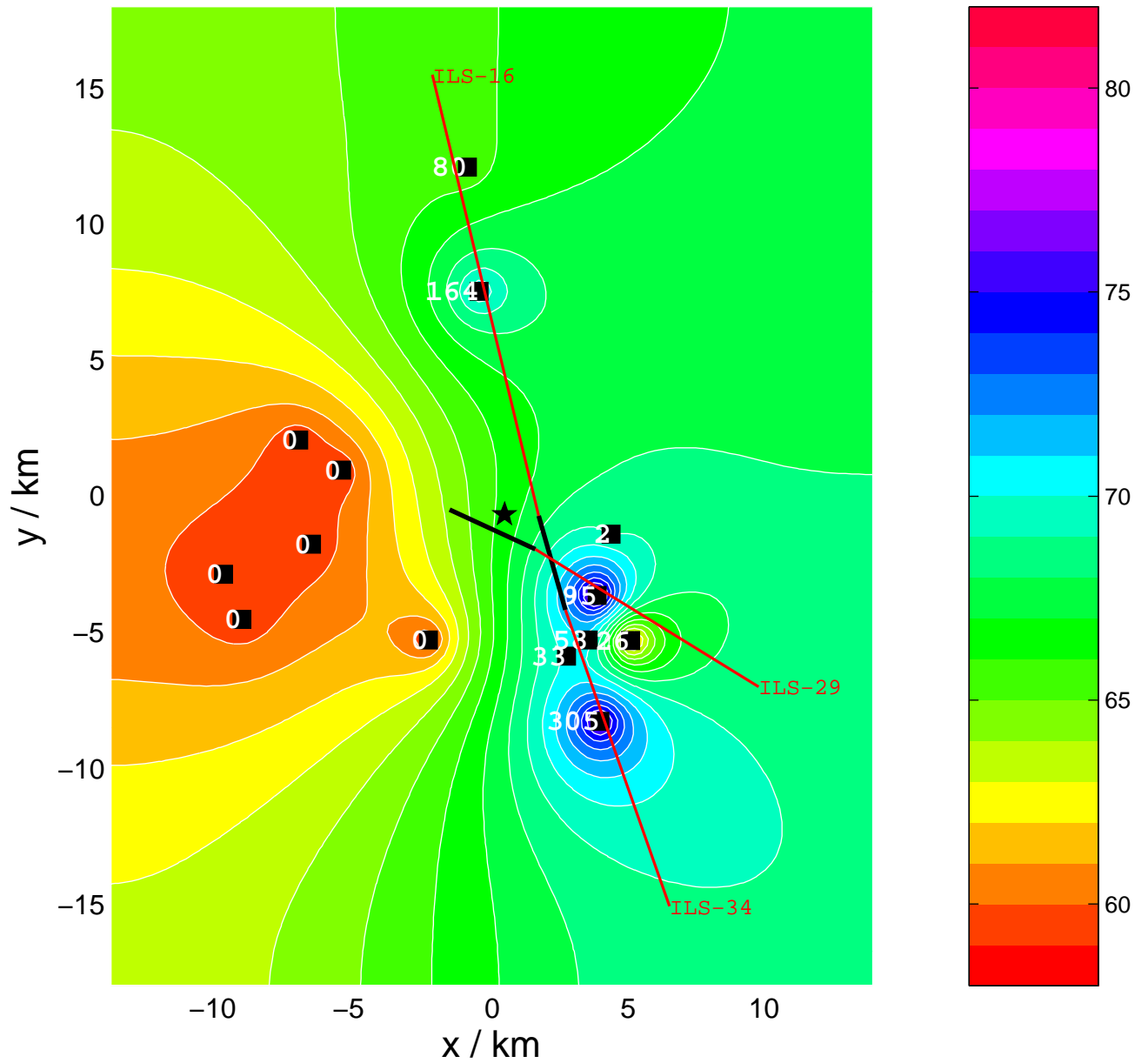


Abbildung 7.14: Schallkarte für alle registrierten Landeanflüge an den beiden Sommertagen.

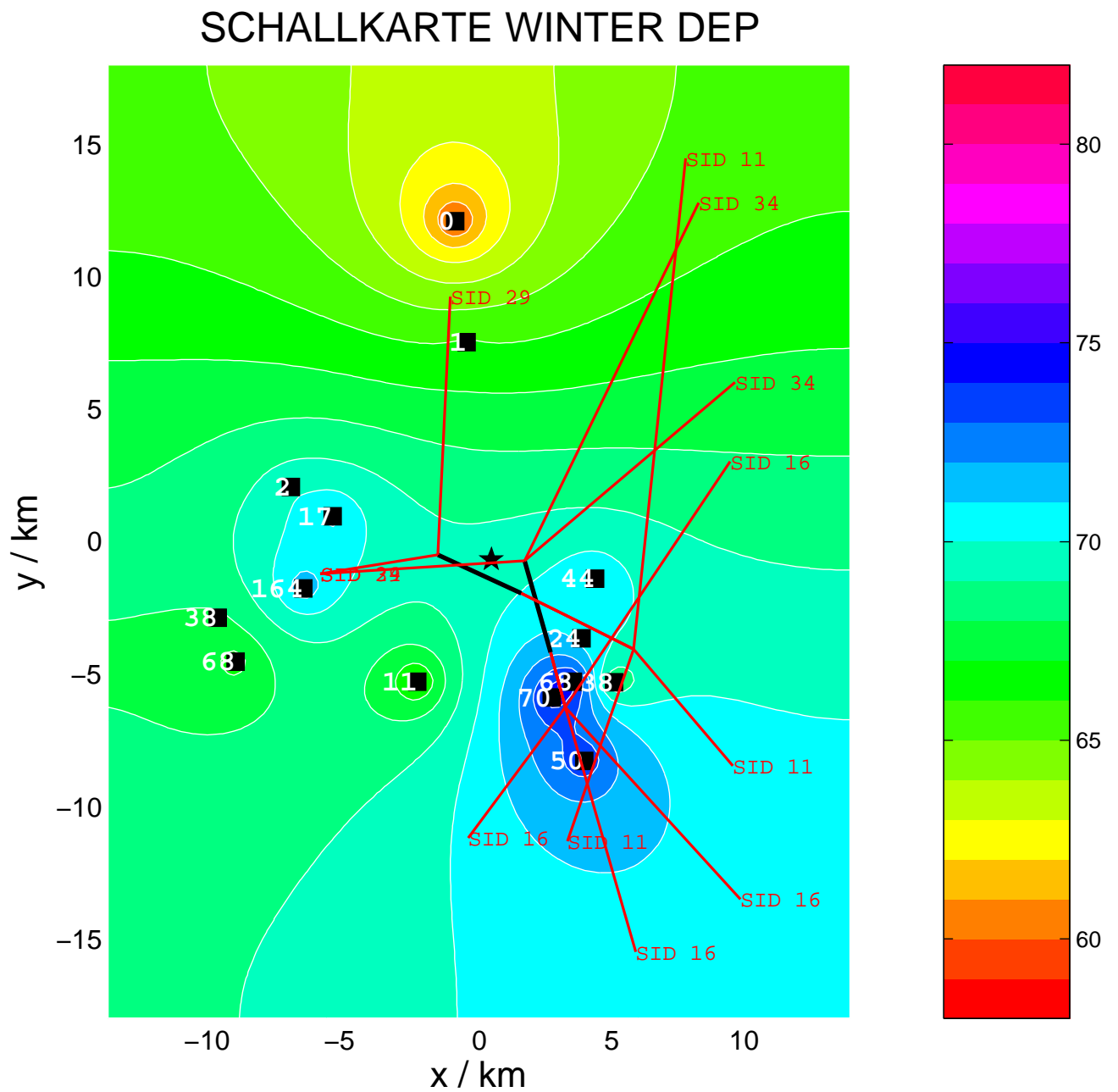


Abbildung 7.15: Schallkarte für alle registrierten Starts an den beiden Wintertagen.

SCHALLKARTE SOMMER DEP

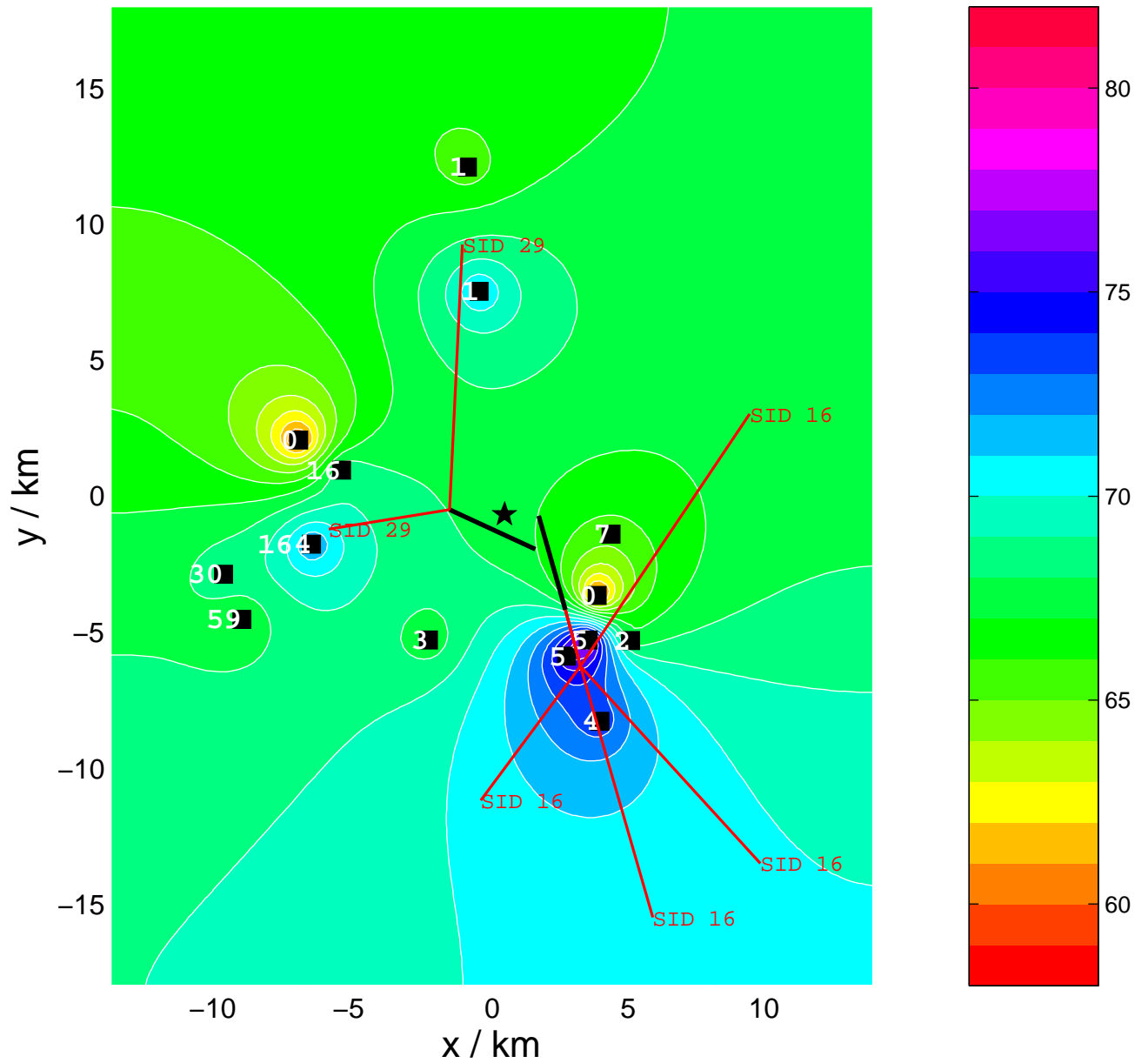


Abbildung 7.16: Schallkarte für alle registrierten Starts an den beiden Sommertagen.

7.5.1 Schallkarte der registrierten Landeanflüge im Winter

Die Schallkarte der registrierten Landeanflüge im Winter setzt sich aus zwei anderen Schallkarten zusammen: jener von den Landeanflügen vom 10. Jänner und vom 14. Dezember (siehe oben). Vergleicht man die Schallkarten vom 10. Jänner und 14. Dezember mit der Winterkarte, so fällt auf, dass es drei Pegelzentren gibt: an den Stationen 4, 7 und 10. Dies ist nicht weiter verwunderlich, waren doch genau diese Stationen an den beiden einzelnen Tagen Pegelzentren.

7.5.2 Schallkarte der registrierten Landeanflüge im Sommer

Diese Schallkarte setzt sich aus den Schallkarten der registrierten Landeanflüge vom 21. Juli und vom 10. August zusammen. Die Pegelzentren befinden sich an den Stationen 4 und 7, ein schwaches Pegelzentrum ist an der Station 2 zu finden. Auch dies ist wenig überraschend, wenn man die Schallkarten für die einzelnen Tage betrachtet: So befinden sich am 21. Juli die Pegelzentren an genau denselben Stationen. Am 10. August gibt es keine Messwerte für Landeanflüge an der Station 2, die Pegelzentren an diesem Tag sind aber wiederum die Stationen 4 und 7.

7.5.3 Schallkarte der registrierten Starts im Winter

Diese Schallkarte setzt sich aus den Schallkarten der registrierten Starts vom 10. Jänner und vom 14. Dezember zusammen. Die Pegelzentren befinden sich an den Stationen 5, 6 und 7, ein leichtes Zentrum ist an der Station 2 zu finden. Betrachtet man die beiden Tagesschallkarten, so ist dies nicht weiter verwunderlich. Liegen doch die Pegelzentren für die registrierten Starts am 10. Jänner an den Stationen 2, 5, 6 und 7. Am 14. Dezember weisen die Stationen 5, 6, 7 und 10 die höchsten Dezibelwerte auf.

7.5.4 Schallkarte der registrierten Starts im Sommer

Diese Karte setzt sich aus den Schallkarten der registrierten Starts vom 21. Juli und vom 10. August zusammen. Die Pegelzentren befinden sich an den Stationen

5, 6 und 10. Betrachtet man die einzelnen Tagesschallkarten, so ist dies auch in diesem Fall nicht weiter überraschend.

Leider konnten aus den Sommer- und Winterschallkarten keine neuen Erkenntnisse gewonnen werden. Im Gegenteil erscheinen diese Karten weniger aussagekräftig, da bei diesen Karten die Mittelwerte immer aus zwei Tagen berechnet wurde. Gibt einen Station, die an beiden Tagen einen Maximumwert aufweist, so kommt dies bei der über zwei Tage gemittelten Karte noch deutlicher zum Ausdruck. Ansonsten scheint das Schallfeld bei den Sommer- und Winterkarten homogener.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Basierend auf den theoretischen Grundlagen, welche in Kapitel 2 beschrieben wurden, kann man davon ausgehen, dass die Schallausbreitung in der Atmosphäre von deren Zustand wesentlich beeinflusst wird. Vor allem die thermische Schichtung, aber auch die Windrichtung und Windstärke spielen eine entscheidende Rolle, während der Effekt der atmosphärischen Dämpfung von geringer Relevanz ist und daher in dieser Diplomarbeit auch nicht näher behandelt wurde.

Dass in der Auswertung der FANOMOS-Daten die oben genannten Effekte kaum nachgewiesen werden konnten, und kein Unterschied zwischen der Schallausbreitung zwischen Sommer und Winter feststellbar ist, kann u. a. folgende Gründe haben:

8.1 Die Datenmenge

Bedenkt man, dass FANMOS bereits seit 1992 alle Überflüge misst, ist die mit vier Tagen in dieser Diplomarbeit betrachtete Datenmenge im Vergleich dazu sehr gering. Überhaupt wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit nur der Einfluss der thermischen Schichtung auf die Schallausbreitung untersucht, während Windrichtung und Windstärke vernachlässigt wurden. Es ist durchaus möglich, dass bei Betrachtung einer größeren Datenmenge und unter Berücksichtigung des Windes sehr wohl Unterschiede zwischen verschiedenen Wetterlagen bei der Schallaus-

breitung ersichtlich werden würde. Weitere Auswertungen in diese Richtung wäre also durchaus interessant und wünschenswert.

8.2 Die Überflughöhe der Messgeräte

Die Station Wien-Essling ist mit 700 m mit Abstand die Station mit der größten Überflughöhe. Mit den Stationen Groß-Enzersdorf (450 m) und Wien-Simmering (350 m) werden von 14 Stationen bloß drei in einer Höhe von mehr als 300 m überflogen. Diese Tatsache läßt die Annahme zu, dass die Flugzeuge bereits zu tief über die Messstationen fliegen und die Atmosphäre nur noch einen geringen Einfluss auf die Schallausbreitung hat.

8.3 Der Fingerprint

Eine Verbesserung der Schallkarten würde sicher neue Erkenntnisse bringen. Wie in Kapitel 7.1 erwähnt wurde VERA entwickelt, um meteorologische Felder wie Wind und Temperatur graphisch darzustellen. Dazu wird ein Algorithmus verwendet, der davon ausgeht, dass die Krümmung der meteorologischen Felder minimal ist. Bei der Ausbreitung des Schalls ist aber davon auszugehen, dass sich die Maxima entlang der Flugbahnen, und nicht wie bei den im Rahmen dieser Arbeit erstellten Schallkarten an den Messstellen, befinden:

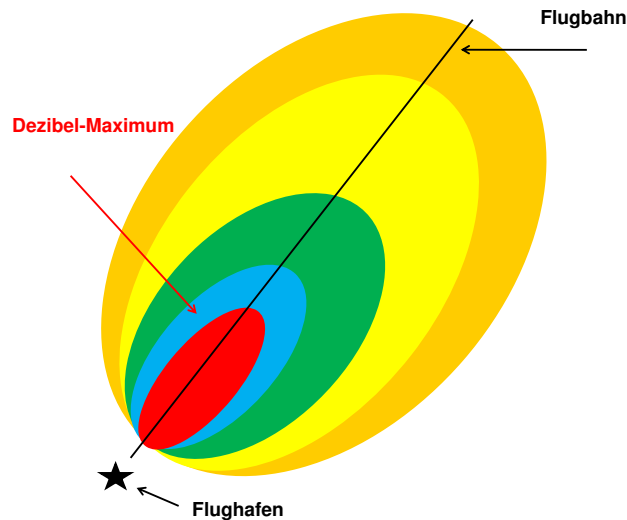


Abbildung 8.1: Schematische Darstellung der Schallausbreitung entlang der Flugbahn

Abbildung 8.1 dient zur Veranschaulichung der Schallausbreitung. Es handelt sich dabei um eine grobe Darstellung, sie dient zum besseren Verständnis.

Es würde äußerst sinnvoll erscheinen einen Fingerprint für die Schallausbreitung aus diesem „Blütenmuster“ zu entwickeln und anschließend eine neue VERA-Analyse durchzuführen. Das Ergebnis würde von diesen Schallkarten vermutlich deutlich abweichen und einen besseren Einblick in die Materie ermöglichen.

Das Thema dieser Diplomarbeit stellte sich als sehr komplex heraus. Die Schallausbreitung am Flughafen Wien Schwechat ist von sehr vielen Faktoren abhängig, weshalb eine sinnvolle Auswertung der Daten sich im begrenzten Rahmen einer Diplomarbeit als nicht ganz einfach erwies. Abschließend muss gesagt werden, dass diese Arbeit sicher nur die Oberfläche der Thematik berührt und den Boden für weitere Forschung bereitet hat. Um das Potential des Datensatzes vollständig ausschöpfen zu können bedarf es weiterer Untersuchungen. Es wäre ein Projekt mit mehreren Mitarbeitern von Nöten um die Daten vollständig auszuwerten und zu einem aussagekräftigeren Ergebnis zu gelangen.

9 BILDANHANG

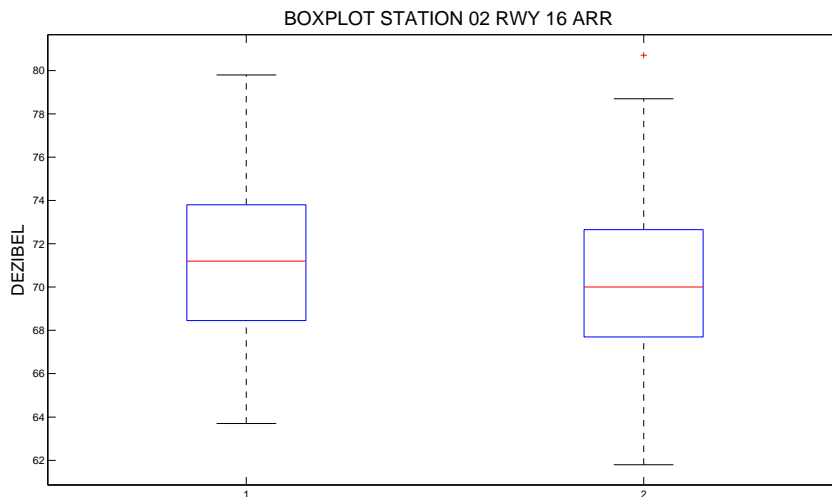


Abbildung 9.1: Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 2 - Groß-Enzersdorf für Landeanflüge auf die Piste 16 am 21. Juli 2006 (links) und am 14. Dezember 2006 (rechts). Der Stichprobenumfang beträgt am 21. Juli 164 und am 12. Dezember 283 Messungen.

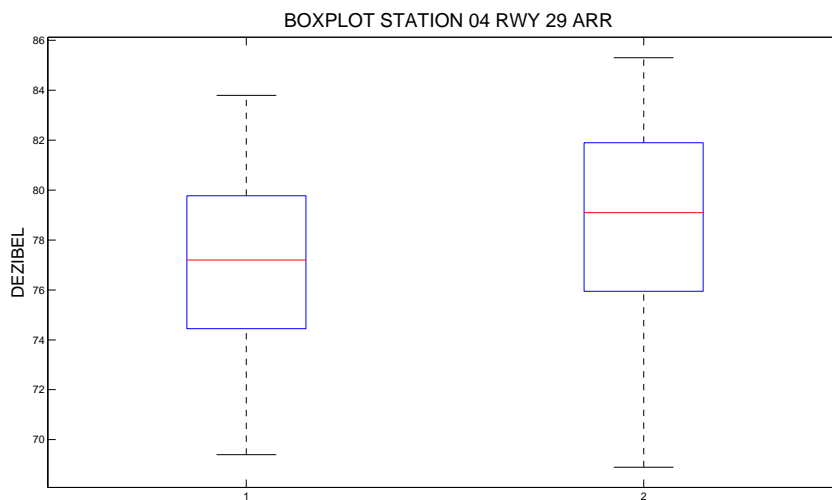


Abbildung 9.2: Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 4 - Klein-Neusiedl für Landeanflüge auf die Piste 29 am 10. Jänner 2006 (links) und am 10. August 2006 (rechts). Der Stichprobenumfang beträgt am 10. Jänner 35 und am 10. August 72 Messungen.

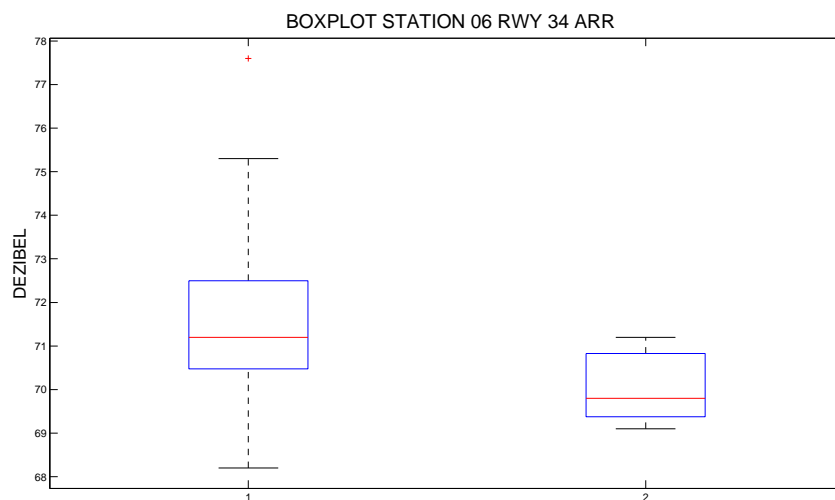


Abbildung 9.3: Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 6 - Schwadorf für Landeanflüge auf die Piste 34 am 10. Jänner 2006 (links) und am 21. Juli 2006 (rechts). Der Stichprobenumfang beträgt am 10. Jänner 17 und am 21. Juli 7 Messungen.

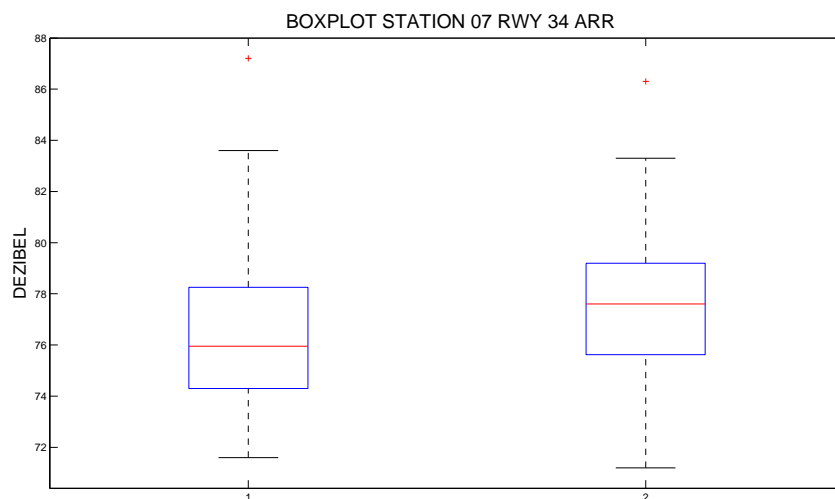


Abbildung 9.4: Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 7 - Margarethen/Moos für Landeanflüge auf die Piste 34 am 10. Jänner 2006 (links) und am 21. Juli 2006 (rechts). Der Stichprobenumfang beträgt am 10. Jänner 80 und am 21. Juli 91 Messungen.

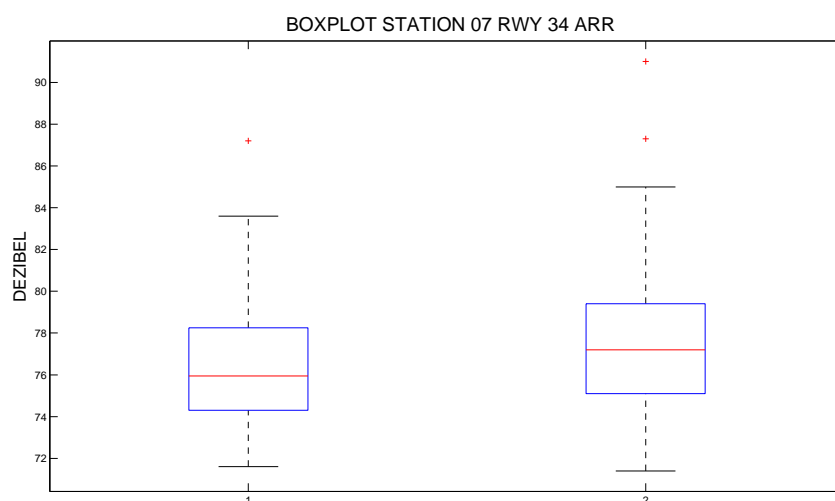


Abbildung 9.5: Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 6 - Schwadorf für Landeanflüge auf die Piste 34 am 10. Jänner 2006 (links) und am 10. August 2006 (rechts). Der Stichprobenumfang beträgt am 10. Jänner 17 und am 10. August 24 Messungen.

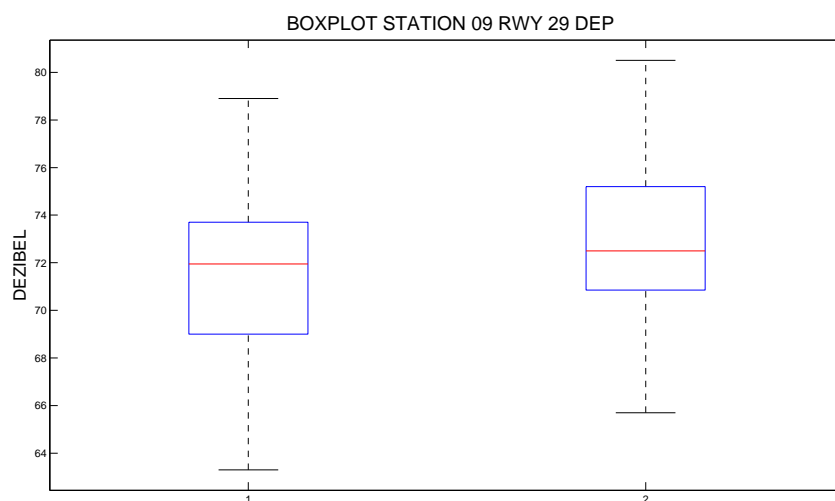


Abbildung 9.6: Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 9 - Zwölfaxing für Starts von der Piste 29 am 10. Jänner 2006 (links) und am 10. August 2006 (rechts). Der Stichprobenumfang beträgt am 10. Jänner 62 und am 10. August 76 Messungen.

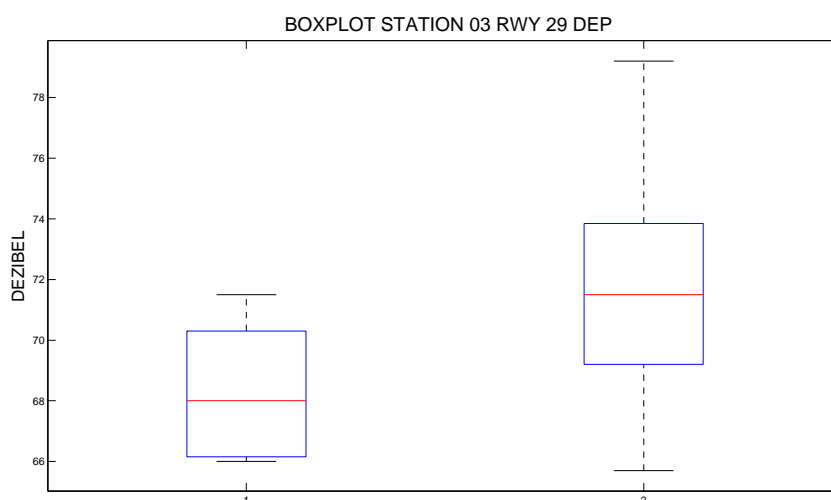


Abbildung 9.7: Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 3 - Fischamend für Starts von der Piste 29 am 10. Jänner 2006 (links) und am 14. Dezember 2006 (rechts). Der Stichprobenumfang beträgt am 10. Jänner 5 und am 14. Dezember 36 Messungen.

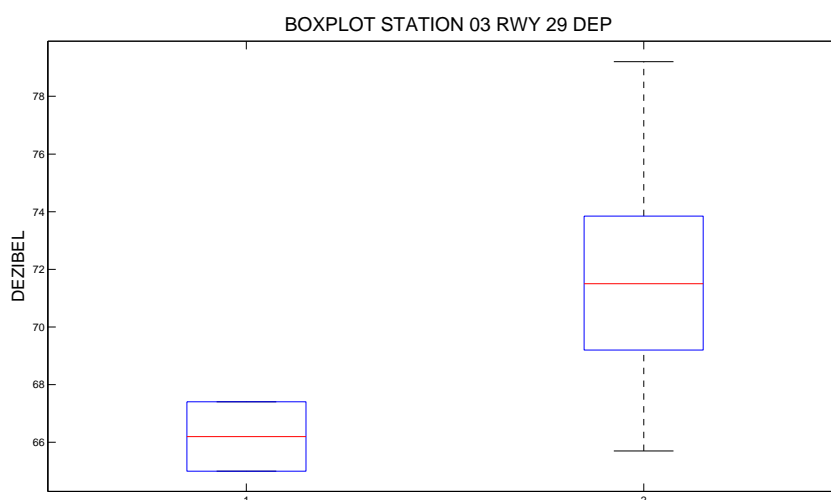


Abbildung 9.8: Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 3 - Fischamend für Starts von der Piste 29 am 21. Juli 2006 (links) und am 14. Dezember 2006 (rechts). Der Stichprobenumfang beträgt am 21. Juli 2 und am 14. Dezember 36 Messungen.

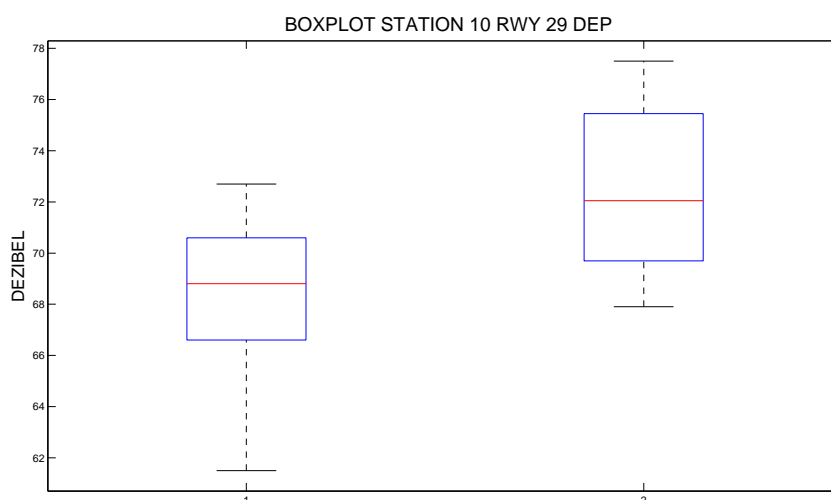


Abbildung 9.9: Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 10 - Schwechat für Starts von der Piste 29 am 21. Juli 2006 (links) und am 14. Dezember 2006 (rechts). Der Stichprobenumfang beträgt am 21. Juli 8 und am 14. Dezember 12 Messungen.

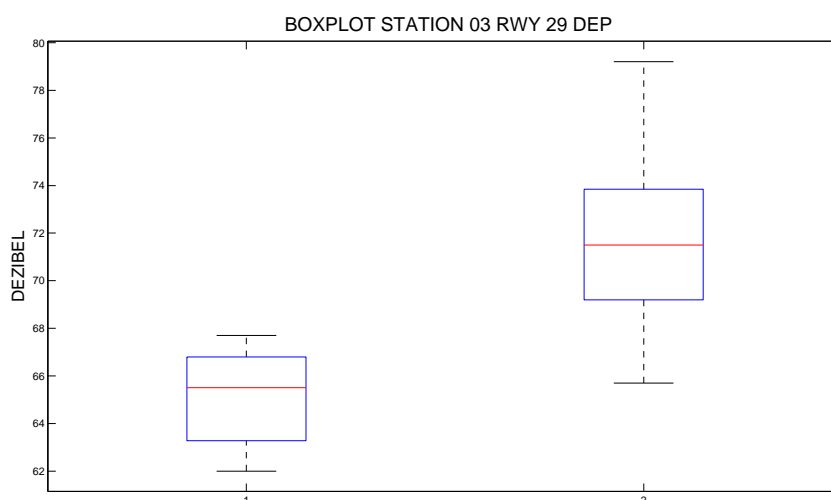


Abbildung 9.10: Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 3 - Fischamend für Starts von der Piste 29 am 10. August 2006 (links) und am 14. Dezember 2006 (rechts). Der Stichprobenumfang beträgt am 10. August 5 und am 14. Dezember 36 Messungen.

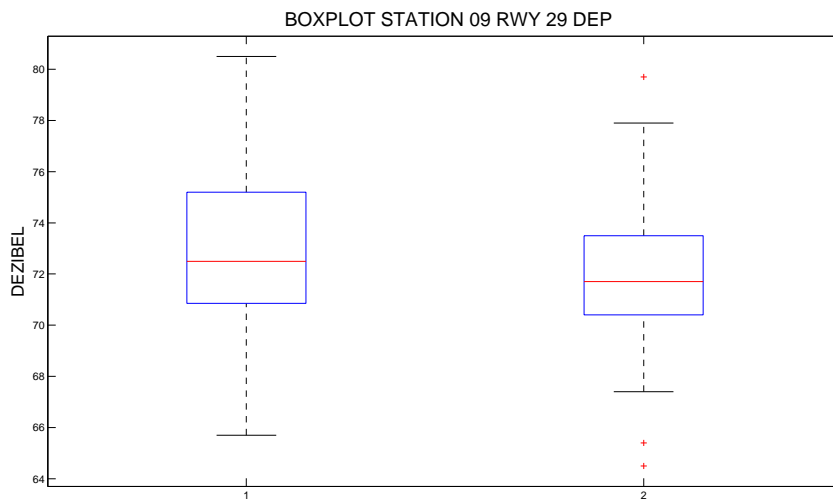


Abbildung 9.11: Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 9 - Zwölfaxing für Starts von der Piste 29 am 10. August 2006 (links) und am 14. Dezember 2006 (rechts). Der Stichprobenumfang beträgt am 10. August 76 und am 14. Dezember 102 Messungen.

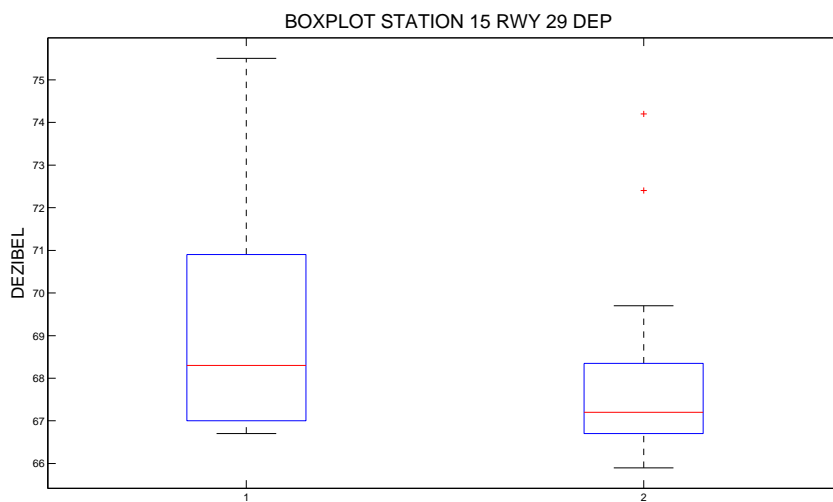


Abbildung 9.12: Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 15 - Maria Lanzendorf für Starts von der Piste 29 am 10. August 2006 (links) und am 14. Dezember 2006 (rechts). Der Stichprobenumfang beträgt am 10. August 18 und am 14. Dezember 24 Messungen.

10 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|---|----------|
| Abbildung 3.1: Der Aufbau der atmosphärischen Grenzschicht | Seite 23 |
| Abbildung 3.2: Die Ekman-Spirale | Seite 24 |
| Abbildung 3.3 Labile, stabile und neutrale Schichtung | Seite 27 |
| Abbildung 4.1: Die graphische Darstellung der Messstationen | Seite 31 |
| Abbildung 4.2 Die Messstationen | Seite 32 |
| Abbildung 4.3: Die Radiosondenaufstiege der Station Wien-Hohe Warte um 12 UTC für die beiden Wintertage | Seite 33 |
| Abbildung 4.4: Die Radiosondenaufstiege Wien-Hohe Warte um 12 UTC für die beiden Sommertage | Seite 34 |
| Abbildung 4.5: Windstärke, Windrichtung und Temperatur für die beiden Wintertage | Seite 35 |
| Abbildung 4.6: Windstärke, Windrichtung und Temperatur für die beiden Sommertage | Seite 35 |
| Abbildung 5.1 Die Messungen der Station 7 - Margarethen/ Moos | Seite 36 |
| Abbildung 5.2: Die Anzahl der Messungen der Station 11 - Wien Simmering | Seite 37 |
| Abbildung 5.3: Die Pistenrichtungen am Flughafen Wien Schwechat | Seite 38 |
| Abbildung 6.1: Zeitreihe aller gemessenen Landeanflüge vom 10. Jänner 2006 | Seite 39 |
| Abbildung 6.2: Zeitreihe aller gemessenen Landeanflüge vom 21. Juli 2006 | Seite 39 |
| Abbildung 6.3: Zeitreihe aller gemessenen Landeanflüge vom 10. August 2006 | Seite 40 |
| Abbildung 6.4: Zeitreihe aller gemessenen Landeanflüge vom 14. Dezember 2006 | Seite 40 |
| Abbildung 6.5: Zeitreihe aller gemessenen Starts vom 10. Jänner 2006 | Seite 43 |
| Abbildung 6.6: Zeitreihe aller gemessenen Starts vom 21. Juli 2006 | Seite 44 |
| Abbildung 6.7: Zeitreihe aller gemessenen Starts vom 10. August 2006 | Seite 44 |
| Abbildung 6.8: Zeitreihe aller gemessenen Starts vom 14. Dezember 2006 | Seite 45 |
| Abbildung 7.1: Schallkarte für die Landeanflüge vom 10. Jänner 2006 | Seite 50 |
| Abbildung 7.2: Schallkarte für alle registrierten Landeanflügen vom 10. Jänner 2006 | Seite 52 |

| | |
|---|----------|
| Abbildung 7. 3: Schallkarte für alle registrierten Starts vom 10. Jänner 2006 | Seite 53 |
| Abbildung 7. 4: Schallkarte für alle registrierten Landeanflügen vom 21. Juli 2006 | Seite 54 |
| Abbildung 7. 5: Schallkarte für alle registrierten Starts vom 21. Juli 2006 | Seite 55 |
| Abbildung 7. 6: Schallkarte für alle registrierten Landeanflügen vom 10. August 2006 | Seite 56 |
| Abbildung 7. 7: Schallkarte für alle registrierten Starts vom 10. August 2006 | Seite 57 |
| Abbildung 7. 8: Schallkarte für alle registrierten Landeanflügen vom 14. Dezember 2006 | Seite 58 |
| Abbildung 7. 9: Schallkarte für alle registrierten Starts vom 14. Dezember 2006 | Seite 59 |
| Abbildung 7.10: Histogramm der Station 7 - Margarethen/ Moos vom 10. August 2006 | Seite 64 |
| Abbildung 7.11: Die Ergebnisse des U-Tests | Seite 68 |
| Abbildung 7.12: Der Box-Whisker-Plot | Seite 69 |
| Abbildung 7.13: Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 4 - Klein-Neusiedl für Landeanflüge auf die Piste 29 am 10. Jänner 2006 und am 21. Juli 2006 | Seite 71 |
| Abbildung 7.14: Schallkarte für alle registrierten Landeanflüge an den beiden Wintertagen | Seite 72 |
| Abbildung 7.15: Schallkarte für alle registrierten Landeanflüge an den beiden Sommertagen | Seite 73 |
| Abbildung 7.16: Schallkarte für alle registrierten Starts an den beiden Wintertagen | Seite 74 |
| Abbildung 7.17: Schallkarte für alle registrierten Starts an den beiden Sommertagen | Seite 75 |
| Abbildung 8. 1: Schematische Darstellung der Schallausbreitung entlang der Flugbahn | Seite 79 |
| Abbildung 9. 1: Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 2 - Groß-Enzersdorf für Landeanflüge auf die Piste 16 am 21. Juli 2006 und am 14. Dezember 2006 | Seite 80 |

- Abbildung 9. 2:** Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 4 - Klein-Neusiedl für Landeanflüge auf die Piste 29 am 10. Jänner 2006 und am 10. August 2006 Seite 80
- Abbildung 9. 3:** Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 6 - Schwadorf für Landeanflüge auf die Piste 34 am 10. Jänner 2006 und am 21. Juli 2006 Seite 81
- Abbildung 9. 4:** Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 7 - Margarethen/ Moos für Landeanflüge auf die Piste 34 am 10. Jänner 2006 und am 21. Juli 2006 Seite 81
- Abbildung 9. 5:** Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 6 - Schwadorf für Landeanflüge auf die Piste 34 am 10. Jänner 2006 und am 10. August 2006 Seite 82
- Abbildung 9. 6:** Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 9 - Zwölfaxing für Starts von der Piste 29 am 10. Jänner 2006 und am 10. August 2006 Seite 82
- Abbildung 9. 7:** Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 3 - Fischamend für Starts von der Piste 29 am 10. Jänner 2006 und am 14. Dezember 2006 Seite 83
- Abbildung 9. 8:** Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 3 – Fischamend für Starts von der Piste 29 am 21. Juli 2006 und am 14. Dezember 2006 Seite 83
- Abbildung 9. 9:** Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 10 - Schwechat für Starts von der Piste 29 am 21. Juli 2006 und am 14. Dezember 2006 Seite 84
- Abbildung 9.10:** Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 3 - Fischamend für Starts von der Piste 29 am 10. August 2006 und am 14. Dezember 2006 Seite 84
- Abbildung 9.11:** Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 9 - Zwölfaxing für Starts von der Piste 29 am 10. August 2006 und am 14. Dezember 2006 Seite 85

Abbildung 9.12: Box-Whisker-Plot für die Daten der Station 15 - Maria Lanzendorf für Starts von der Piste 29 am 10. August 2006 und am 14. Dezember 2006

Seite 85

LEBENS LAUF

Persönliche Daten

Name Tina Trapper
Staat Österreich
Geburtsdatum 11. November 1982
Geburtsort Wiener Neustadt, Niederösterreich

Familie

Vater Herbert Trapper, Lehrer
Mutter Maria Trapper geb. Wöhrer, Lehrerin
Geschwister Carina Trapper, Studentin
Anja Trapper, Studentin

Ausbildung

1989-1993 Volksschule Stollhof
1993-1997 Hauptschule Winzendorf-Muthmannsdorf
1997-2001 Bundesoberstufenrealgymnasium (BORG) in Wr. Neustadt
06/2001 Matura
ab 2001 Studium der Meteorologie an der Universität Wien

Berufserfahrung

1999-2001 Schulbegleitend freie Mitarbeit Niederösterreichische Nachrichten (NÖN)
08/2001 Ferialpraktikum Buchhaltung BA-CA
07/2004-08/2004 Urlaubsvertretung Postzustellung
ab 09/2003 Tutorin am Institut für Meteorologie an der Universität für Bodenkultur
03/2006 Ausbildungspraktikum Austro Control/ Wetterdienst
07/2007 Ausbildungspraktikum Austro Control/ Wetterdienst
12/2007-12/2008 Projektmitarbeiter MESOCLIM/ Institut für Meteorologie und Geophysik

Kompetenzen

Muttersprache Deutsch
Sonstige Sprachen gute Kenntnisse Englisch, Grundkenntnisse Italienisch
Computer Microsoft Windows, Office, Fortran90, Matlab

11 LITERATURVERZEICHNIS

Literatur

- [1] BERGMANN-SCHÄFER: Erde und Planeten, de Gruyter, 2001
- [2] BORUCKI H.: Einführung in die Akustik, B.I.-Wissenschaftsverlag, 1980
- [3] CREMER L.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, 1948
- [4] ETLING, Dieter: Theoretische Meteorologie, Springer-Verlag, 1996
- [5] EHRFRIED K.: Skriptum Strömungsakustik, TU-Berlin, WS 02/03;
<http://vento.pi.tu-berlin.de/formB/kapitel01.pdf> am 20.09.08 um 19:02
- [6] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR AKUSTIK e. V.:
DEGA_Empfehlung_101, www.dega-akustik.de/publikationen/DEGA_Empfehlung_101.pdf; am 04.10.08, um 13:14
- [7] DIALOG FORUM WIEN: Evaluierungsbericht 2005
- [8] GORGAS Th.: Vergleich von numerischen Wettervorhersage-Modellen mittels VERA, Diplomarbeit, 2006
- [9] HANTEL M. und MAYER D.: Theoretische Meteorologie II, Wiener Meteorologische Schriften, Heft 5, 2006
- [10] HEIMANN D.: <http://www.pa.op.dlr.de/acoustics/essay1/laerm.html>; am 12.10.08 um 18:50
- [11] MALBERG H.: Meteorologie und Klimatologie. Eine Einführung, Springer Verlag 1997
- [12] KNABL Th: Klimatologische Auswertung der VERA-Druckanalysen von 1989-2001, Diplomarbeit, 2004
- [13] SCHÖNWIESE C. D.: Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler, Gebrüder Borntraeger, 2000

- [14] TIPLER P. A.: Physik, Spektrum akademischer Verlag, 2000
- [15] STEINACKER et. all: A Transparent Method for the Analysis and Quality Evaluation of Irregularly Distributed and Noisy Observational Data, Monthly Weather Review Vol.128, 2000
- [16] WAETZMANN E., SCHOLZ J. und KRUEGER H.: Zur Schallausbreitung in der Atmosphäre, Akustische Zeitschrift, 3. Jahrgang, 1938
- [17] Flughafen Wien Schwechat: www.vie-umwelt.at , am 21.10.08 um 19:01
- [18] Institut für Meteorologie und Geophysik: <http://www.univie.ac.at/IMG-Wien/vera/index.html> am 07.11.08 um 12:51
- [19] Land Niederösterreich:
http://www.noel.gv.at/Verkehr-Technik/Luftfahrt/Flugverkehr/Flughafen_vie.wai.html
am 07.11.08 um 19:24
- [20] www.dialogforum.at/jart/prj3/via/data/uploads/Evaluierungsberichte_Oldwebsite/2004/Auswirkungen.pdf, am 11.11.08 um 18:26, S.20
- [21] http://www.global2000.at/files/Dossier_Flugverkehr_Endversion.pdf am 28.01.09 um 17:34
- [22] <http://mathworld.wolfram.com/Box-and-WhiskerPlot.html> am 29.01.09 um 11:03
- [23] http://www.laermschutzprogramm.at/jart/prj3/via/tls.jart?rel=de&content-id=1148033761936&reserve-mode=active&back_button=yes am 29.01.09 um 15:49