

# Erweiterung des FSO-Kanalmodells für mehrere Atmosphärenschichten und Implementierung der ERA-15 Daten

Masterarbeit

Bernhard Hillbrand

---

Institut für Breitbandkommunikation  
Technische Universität Graz



Betreuer: Ao.Univ.Prof. Dr. Erich Leitgeb  
Mitbetreuer: Dipl.-Ing. Paul Brandl

Graz, im Dezember 2010

## **Kurzfassung**

Durch den erfolgreichen Einsatz von Free Space Optics für terrestrische Anwendungen, als auch im Weltraum zwischen zwei Satelliten entstand die Nachfrage nach optischen Übertragungen zwischen Bodenstationen und Satelliten. Auf Grund der großen Distanzen, aber vor allem wegen dämpfenden atmosphärischen Einflüssen ist dies schwierig zu realisieren. Um sich diese störenden Effekte wie Regen, Schnee, Szintillationen und vor allem Nebel bzw. Wolken und deren Auswirkungen auf die Übertragungstrecke besser veranschaulichen zu können wurde ein bestehendes Kanalmodell in MATLAB weiter entwickelt. Das Modell simuliert eine beliebige Übertragung und berechnet die Dämpfung die entlang der Strecke auftritt.

Zusätzlich wurde in dem Programm die ERA-15 Wetterdatenbank eingefügt, die für ausgewählte Zeitpunkte und Orte atmosphärische Parameter zur Verfügung stellt, die zur Berechnung verwendet werden. So soll man eine möglichst realistische Simulation einer optischen Übertragungstrecke zwischen Bodenstationen und Satelliten erhalten.

In dieser Arbeit wurde zuerst auf die Parameter eingegangen, die zur Berechnung der Formeln benötigt werden und darauf, wie sie in eine geeignete Form gebracht wurden. Danach wurden die Formeln selbst beschrieben, die zur Berechnung der einzelnen Dämpfungen verwendet werden. Des Weiteren wurden das Kanalmodell, seine grafische Oberfläche und seine Funktionen erläutert. Abschließend wurde auf den MATLAB-Code eingegangen.

## **Abstract**

Because of the successful application of Free Space Optics for terrestrial applications, as well as in the space between two satellites, the request for optical links between ground stations and satellites was originated. Due to the big distances, but above all because of restraining atmospheric influences this is difficult to realize. To be able to illustrate these annoying effects like rain, snow, scintillations and above all fog respectively clouds and their consequences on the transference an existing canal model was developed further in MATLAB. The model simulates any transference and calculates the attenuation that appears along the distance.

In addition, the ERA-15 weather database was included in the program which gives you the atmospheric parameters for the chosen time and location that are needed for the calculation. Thus one should receive a very realistic simulation of an optical link between ground stations and satellites.

In this thesis the parameters which were required for the calculation of the formulas were mentioned first and how they were converted into a suitable form. Then the formulas themselves which were used for the calculation of the several attenuations were described. Then the canal model, its graphical user interface and its functions were explained. Finally the MATLAB code was illustrated.

Deutsche Fassung:  
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008  
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

## EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....  
(Unterschrift)

Englische Fassung:

## STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....  
date

.....  
(signature)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretischer Hintergrund</b>	<b>2</b>
2.1	Free Space Optics . . . . .	2
2.2	Das Kanalmodell . . . . .	4
2.2.1	Ursprüngliches Modell . . . . .	4
2.2.2	Motivation für die Erweiterung . . . . .	6
2.3	Die ERA-15 Datenbank . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Grundlegende Beziehungen der Wetterparameter</b>	<b>9</b>
3.1	Verarbeitung der ERA-15 Daten . . . . .	9
3.1.1	Regen . . . . .	9
3.1.2	Schnee . . . . .	11
3.1.3	Wolken . . . . .	12
3.1.4	Visibility . . . . .	12
3.2	Im Modell implementierte Formeln . . . . .	14
3.2.1	Geometrische Verluste . . . . .	16
3.2.2	Nebel-/Wolkenverluste . . . . .	16
3.2.3	Regenverluste . . . . .	19
3.2.4	Schneeverluste . . . . .	20
3.2.5	Szintillationsverluste . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Implemetierung</b>	<b>24</b>
4.1	Die grafische Benutzeroberfläche . . . . .	24
4.1.1	Time and Location . . . . .	24
4.1.2	Transmitter Einstellungen . . . . .	26
4.1.3	Receiver Einstellungen . . . . .	27
4.1.4	Kanaleinstellungen . . . . .	27
4.1.5	Nebel-/Wolkeneinstellungen . . . . .	27
4.1.6	Regeneinstellungen . . . . .	28
4.1.7	Szintillationseinstellungen . . . . .	28
4.1.8	Sonstige Einstellungen (Features) . . . . .	28
4.1.9	Buttons . . . . .	29
4.2	Die Simulation . . . . .	29
4.2.1	Funktion: Simulation (details) . . . . .	29
4.2.2	Funktion: Simulation (year) . . . . .	32

4.2.3	Funktion: Weather statistics . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Quellcode</b>	<b>38</b>
5.1	GUI.m . . . . .	38
5.2	calculation.m . . . . .	40
5.3	simulationYear.m . . . . .	48
5.4	statistics.m . . . . .	49
<b>6</b>	<b>Darstellung von Berechnungsbeispielen</b>	<b>50</b>
6.1	Berechnungsbeispiel Regen . . . . .	50
6.2	Berechnungsbeispiel Wolken . . . . .	52
6.3	Berechnungsbeispiel Nebel . . . . .	52
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerung</b>	<b>57</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>58</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Das SILEX Experiment [1] . . . . .	4
2.2	Benutzeroberfläche von Peter Köhldorfer [2] . . . . .	5
2.3	Benutzeroberfläche von Hansjörg Santner [3] . . . . .	5
2.4	Benutzeroberfläche des Master-Projekts [4] . . . . .	6
2.5	Datensatz des ERA-15 Projekts . . . . .	7
3.1	Verwendungsmöglichkeiten des Parameters <code>r_6h</code> . . . . .	10
3.2	Vergleich der Visibility Modelle mit Messdaten . . . . .	13
3.3	Vergleich der Visibility Modelle mit gemittelten Messdaten . . . . .	15
3.4	Vergleich der beiden Modelle von Kim und Kruse . . . . .	19
3.5	Dämpfung durch Regen . . . . .	20
3.6	Dämpfung durch nassen und trockenen Schnee . . . . .	22
3.7	Szintillationsverluste bei schwachen und starken Fluktuationen . . . . .	23
3.8	Szintillationsverluste bei unterschiedlichen Wellenlängen . . . . .	23
4.1	Die grafische Benutzeroberfläche . . . . .	25
4.2	Detaillierte Numerische Ausgabe der Funktion <code>Simulation</code> (details) . . . . .	31
4.3	Numerische Ausgabe der Funktion <code>Simulation</code> (details) . . . . .	32
4.4	Grafische Ausgabe der Funktion <code>Simulation</code> (details) . . . . .	33
4.5	Numerische Ausgabe der Funktion <code>Simulation</code> (year) . . . . .	34
4.6	Grafische Ausgabe der Funktion <code>Simulation</code> (year) . . . . .	35
4.7	Numerische Ausgabe der Funktion „Weather Statistics“ . . . . .	36
4.8	Grafische Ausgabe der Funktion „Weather Statistics“ . . . . .	37
5.1	Codeausschnitt: Standartwerte festlegen . . . . .	39
5.2	Codeausschnitt: Auswahl des Standorts . . . . .	41
5.3	Codeausschnitt: Laden des Parameters <code>r_6h</code> . . . . .	42
5.4	Codeausschnitt: Unterscheidung zwischen Schnee und Regen . . . . .	43
5.5	Codeausschnitt: Berechnung der Visibility . . . . .	45
5.6	Codeausschnitt: Implementierung des Kim Modells . . . . .	47
6.1	Die numerische Ausgabe für das Berechnungsbeispiel Regen . . . . .	50
6.2	Die grafische Ausgabe für das Berechnungsbeispiel Regen . . . . .	51
6.3	Die numerische Ausgabe für das Berechnungsbeispiel Wolken . . . . .	53
6.4	Die numerische Ausgabe für das Berechnungsbeispiel Wolken . . . . .	53
6.5	Die grafische Ausgabe für das Berechnungsbeispiel Wolken . . . . .	54
6.6	Die numerische Ausgabe für das Berechnungsbeispiel Nebel . . . . .	55

6.7	Die numerische Ausgabe für das Berechnungsbeispiel Nebel . . . . .	56
6.8	Die grafische Ausgabe für das Berechnungsbeispiel Nebel . . . . .	56



# Tabellenverzeichnis

2.1	Zur Berechnung benötigte Parameter . . . . .	8
3.1	Unterscheidung zwischen Regen und Schnee . . . . .	11
3.2	Unterschiedliche Messwerte für Visibility bei gleichem LWC . . . . .	14
3.3	Abweichung der berechneten Visibility zu den gemittelten Messwerten . . . . .	15
4.1	Einstellungen für die Simulations-Beispiele . . . . .	30
6.1	Einstellungen für das Berechnungsbeispiel Regen . . . . .	51
6.2	Einstellungen für das Berechnungsbeispiel Wolken . . . . .	52
6.3	Einstellungen für das Berechnungsbeispiel Nebel . . . . .	54

# 1 Einleitung

Die Übermittlung von Informationen mit optischen Methoden wurde in den vergangenen Jahren immer wichtiger. Dies ist ein Trend, der sich auch in Zukunft fortsetzen wird. Ein Hauptgrund dafür ist die hohe, zur Verfügung stehende Bandbreite. Sei es in Form von Lichtwellenleitern oder optischer Freiraumübertragung, optische Informationsübertragung ist ein wichtiger Bestandteil terrestrischer Kommunikation. Doch auch außerhalb der Troposphäre wurde bereits vor Jahren erfolgreich gezeigt, dass optische Informationsübertragung zwischen Satelliten möglich ist. Aus diesem Grund ist es auch wünschenswert die Übertragung zwischen Bodenstationen und Satelliten optisch zu realisieren. Innerhalb der Troposphäre gibt es dämpfende Faktoren auf die bei der Übertragung Rücksicht genommen werden müssen. Es war deswegen wichtig ein Kanalmodell zu haben, mit dem man die auftretenden Dämpfungen möglichst genau berechnen kann.

Die Aufgabenstellung war deswegen, ein bereits bestehendes Kanalmodell weiter zu entwickeln. Dieses Kanalmodell, das sich zuerst nur auf terrestrische Übertragung beschränkte, wurde im Zuge meines Masterprojekts bereits dahingehend erweitert, dass es für Übertragungen zwischen Bodenstationen und Satelliten geeignet war. Außerdem wurde auch schon ein erster Versuch eines Wolkenschichten-Modells implementiert. Da es aber nicht wünschenswert ist, dass der Benutzer alle benötigten Parameter selbst eingibt, sollte das Kanalmodell nochmals erweitert werden und die ERA-15 Datenbank hinzugefügt werden, die atmosphärische Parameter zur Verfügung stellt um realistische Werte zur Berechnung zu haben.

In Kapitel 2 wird zuerst allgemein auf die Technologie der optischen Freiraumübertragung (Kapitel 2.1) eingegangen. Danach wird der Ursprung des Kanalmodells beschrieben und wie es sich entwickelte (Kapitel 2.2). Außerdem gibt es eine kurze Einführung in die ERA-15 Datenbank (Kapitel 2.3)

Der wissenschaftliche Teil der Arbeit setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Zum Einen werden Formeln benötigt um die einzelnen Dämpfungen zu berechnen, die durch atmosphärische oder geometrische Verluste verursacht werden. Diese kann man im Kapitel 3.2 finden. Zum anderen werden aber auch Berechnungen benötigt, um die zur Verfügung stehenden atmosphärischen Parameter in jene Form zu bringen, in der man sie für die oben genannten Formeln verwenden kann. Diese Berechnungen kann man in Kapitel 3.1 einsehen.

Kapitel 4 beschreibt den Aufbau des Kanalmodells, die grafische Benutzeroberfläche (Kapitel 4.1) und seine Funktionen (Kapitel 4.2). Abschließend wird in Kapitel 5 ein Einblick in den MATLAB Code gegeben.

## 2 Theoretischer Hintergrund

In diesem Kapitel wird zuerst allgemein auf die Technologie der optischen Freiraumübertragung eingegangen und die Vor- und Nachteile die sie mit sich bringt. Danach wird erklärt wie es zu der Idee kam ein Kanalmodell zu erstellen und was die Motivation war dieses Kanalmodell zu erweitern. Des Weiteren wird auch auf die ERA-15 Datenbank eingegangen, die im Zuge dieser Erweiterung implementiert wurde und das Modell mit den nötigen Parametern versorgt.

### 2.1 Free Space Optics

Optische Freiraumübertragung (Free Space Optics, FSO) ist eine Technologie, die es erlaubt große Datenmengen ohne die Verwendung von Kabeln zu übertragen. Wie bei der Glasfasertechnologie werden die Daten dabei als optisches Signal übertragen. Licht als Trägerfrequenz zu verwenden hat den großen Vorteil, dass sehr hohe Datenraten möglich sind, was es auch für die Wirtschaft sehr interessant macht. Die Umstellung auf Glasfaserkabel hat schon längst begonnen und sie werden vor allem als „Backbone“ verwendet. Optische Freiraumübertragung setzt an diesen Stärken an und bringt die Technologie an Orte, an denen man keine Glasfaserkabel verlegen kann oder möchte. Gründe dafür könnten finanzieller Art sein, aber auch die Tatsache, dass man nur eine temporäre Übertragungsstrecke aufbauen möchte. In anderen Fällen ist das Verlegen von Kabeln ganz einfach nicht möglich.

FSO-Systeme werden hauptsächlich im „Last Mile“ Bereich eingesetzt. Typische Anwendungsgebiete wären innerhalb großer Lagerhallen, zwischen Firmengebäuden oder beispielsweise als schneller Ersatz für eine gestörte und schwer reparierbare Kabelverbindung [5]. Der Aufbau einer FSO-Übertragungsstrecke kann relativ schnell durchgeführt werden weswegen es auch ideal für Veranstaltungen genutzt werden kann. So wurde eine selbst gebaute Sende- und Empfangseinheit der TU Graz beim „Aufsteirern“ in der Grazer Innenstadt verwendet [6]. Auch im Bereich des Zivilschutz wurden die Geräte im Rahmen der Übung „Schutz 04“ erfolgreich eingesetzt [7]. Wichtig ist, dass die beiden Einheiten direkte Sichtverbindung haben und genau aufeinander ausgerichtet sind. Um die dauerhafte Sichtverbindung zu gewährleisten, sollten beide Geräte in einer Höhe angebracht sein, in der keine Menschen oder Fahrzeuge das Signal unterbrechen können.

Wie jede Technologie hat auch diese gewisse Vor- und Nachteile. Ein wichtiger Vorteil ist die große Bandbreite und die Tatsache, dass sie auch vollständig zur Übertragung

von Daten genutzt werden kann. Es ist nicht notwendig das eigene Signal vor anderen Signalen abzuschirmen wie es bei Funkübertragungen nötig ist, da die Informationen gebündelt übertragen werden und sich nicht breitgefächert in der Luft ausbreiten. Deswegen tragen FSO auch nicht zum „Elektrosmog“ bei. Außerdem ist die Übertragung abhörsicher, da man beim Versuch des Abhörens die Verbindung unterbrechen würde [8]. Es gibt aber auch Nachteile. Neben den Anforderungen, dass die Sende- und Empfangsgeräte genau aufeinander ausgerichtet sein müssen und ständig eine direkte Sichtverbindung vorhanden sein muss, wirkt sich vor allem der Kanal, also die Atmosphäre und ihre unterschiedlichen Bedingungen als großer Störfaktor aus. Speziell Wetterereignisse wie Wolken, Nebel und Schnee können, zur erheblichen Dämpfung des Übertragungssignals führen. Dabei wirkt sich Nebel am stärksten auf das optische Signal aus. Das liegt daran, dass die Partikelgröße und die Wellenlänge des verwendeten Lichts (750 nm - 1550 nm) in einem solchen Verhältnis stehen, in dem der Einfluss der Störpartikel an Bedeutung zunimmt und es zu Dämpfungen des Signals kommt. Regen wirkt sich auf die optische Übertragung weniger stark aus, da die Partikelgröße mit 0,1 - 5 mm Durchmesser größer ist und somit eher Einfluss auf Wellenlängen im Millimeterbereich nimmt. Deswegen ist für Funksignale auch Regen der größte Dämpfungsfaktor [9].

Die Übertragung selbst erfolgt auf folgende Weise. Das Sendegerät ist mit einer LED oder einem Laser ausgerüstet der das Licht erzeugt. LEDs sind kostengünstig und für den Menschen absolut ungefährlich. Selbst bei direktem Kontakt mit der Netzhaut treten keine Schäden auf, da das Licht von Leuchtdioden einen größeren Öffnungswinkel hat und deswegen auf der Netzhaut als Fläche und nicht als Punkt abgebildet wird. Die von der TU Graz entwickelten Geräte verwenden beispielsweise LEDs [10]. Dieser Vorteil bezüglich der Sicherheit ist aber auch gleichzeitig ein Nachteil. Durch den größeren Öffnungswinkel hat eine Leuchtdiode eine viel größere Strahlaufweitung als ein Laser, der viel stärker gebündeltes Licht erzeugt, und ist deswegen nur für kürzere Distanzen geeignet. Meist wird bei der optischen Freiraumübertragung On-Off Keying (OOK) verwendet, bei dem das Trägersignal an- bzw. ausgeschaltet wird, um eine 1 bzw. eine 0 zu übertragen. Beim Empfänger wird der Strahl von einer Linse eingefangen und mittels einer Photo-PIN-Diode wieder umgewandelt [11].

Die Einsatzmöglichkeiten von Free Space Optics beschränken sich aber längst nicht nur auf terrestrische Anwendungen. Bereits im Jahr 2001 wurde im Rahmen des SILEX Experiments eine optische Übertragungsstrecke zwischen dem erdnahen französischen Satelliten SPOT-4 und dem geostationären ESA Satelliten Artemis aufgebaut und erfolgreich getestet [12]. Dabei wurden Testdaten von SPOT-4 zum optischen Terminal OPALE (Optical Payload for Inter Satellite Link Experiment) auf dem Satelliten Artemis geschickt, der dieses wiederum über das KA-Band zur Bodenstation sendete. Die Abbildung 2.1 zeigt den Testaufbau (die Abbildung wurde entnommen aus [1])

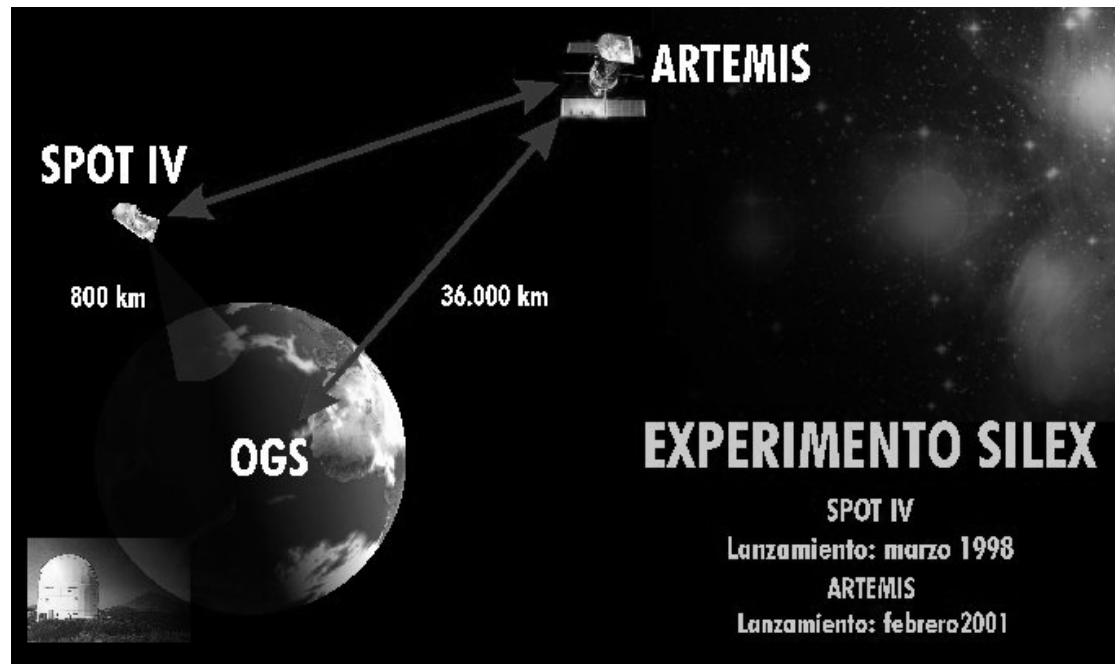


Abbildung 2.1: Das SILEX Experiment [1]

## 2.2 Das Kanalmodell

Auf den folgenden Seiten werden die Anfänge des Kanalmodells gezeigt und wie es sich von einem Programm zur Berechnung der Dämpfung für terrestrischer Übertragungstrecken hin zu dem aktuellen Kanalmodell entwickelt hat.

### 2.2.1 Ursprüngliches Modell

Die Idee ein Simulationsmodell in MATLAB zu programmieren gab es am Institut für Breitbandkommunikation schon lange. Ziel war es ein Programm zu haben, mit dem man die wichtigsten Dämpfungen einer optischen Übertragungstrecke nachvollziehen und mit Messdaten vergleichen konnte. Dabei sollte das Kanalmodell auf das vorhandene Equipment angepasst werden und war dementsprechend für kurze Messstrecken (Last Mile Distanzen) ausgelegt. In Folge entwickelten zwei Studenten unabhängig von einander entsprechende Modelle. Die verwendeten Formel waren dabei im Allgemeinen die gleichen. Der Unterschied zeigte sich vor allem in der Benutzeroberfläche. Peter Köhldorfer [2] (siehe Abb. 2.2) designte sein Modell so, dass alle Grafiken auf der Benutzeroberfläche dargestellt werden, während Hansjörg Santner [3] (siehe Abb. 2.3) auf externe Grafikfenster setzte.

## 2.2 Das Kanalmodell

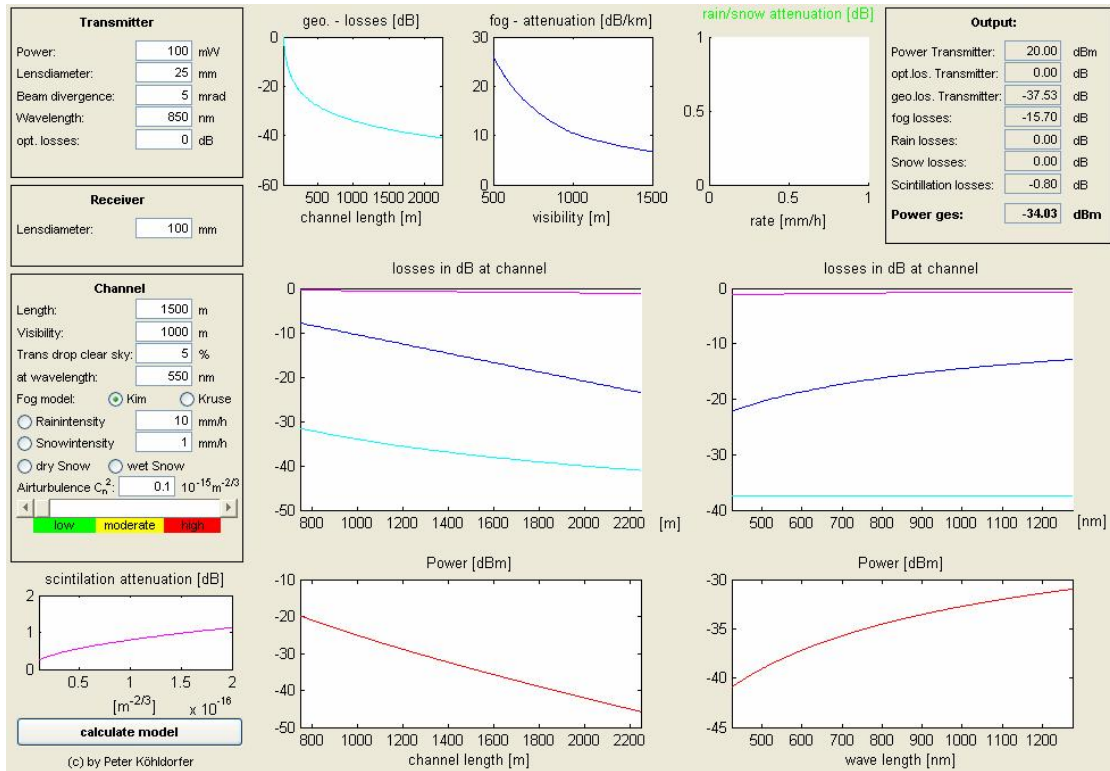


Abbildung 2.2: Benutzeroberfläche von Peter Köhldorfer [2]

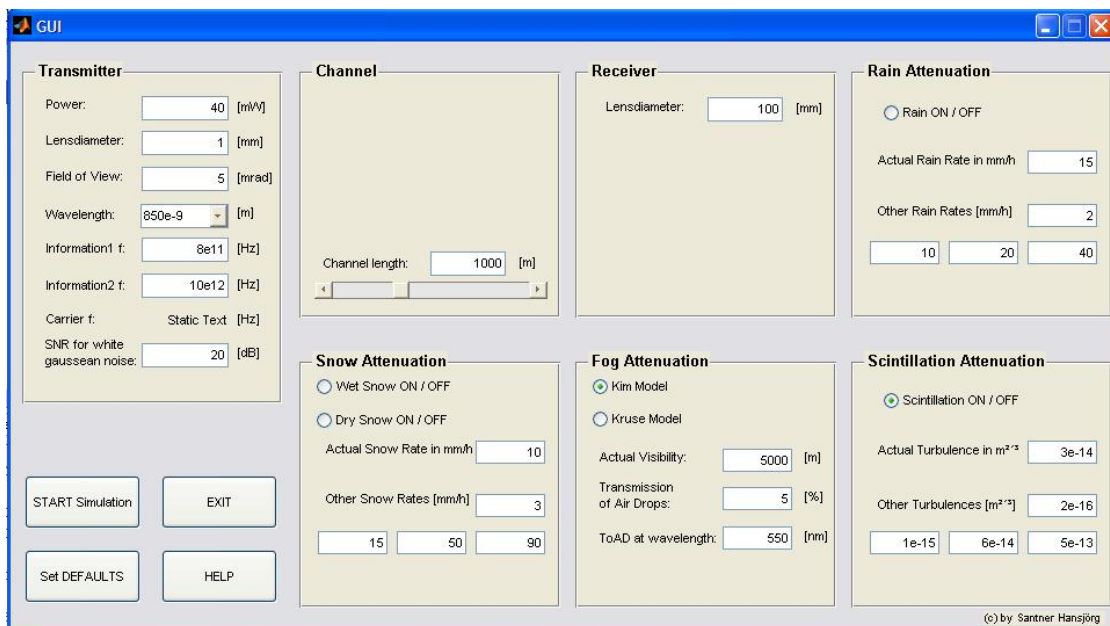


Abbildung 2.3: Benutzeroberfläche von Hansjörg Santner [3]

## 2.2 Das Kanalmodell

Im Rahmen meines Masterprojekts [4] sollte eines der eben genannten Modelle weiterentwickelt und für einen anderen Anwendungsbereich erweitert werden. Das Ziel war nun ein Modell zu programmieren mit dem man nicht nur terrestrische Übertragungsstrecken simulieren könnte, sondern auch Strecken von einer Bodenstation zu einem Satelliten [4]. Diese zusätzliche Zielsetzung erforderte das Implementieren neuer Funktionen wie dem Übertragungswinkel oder den Wolkenschichten, welche zusätzlichen Platz auf der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) benötigten. Deswegen wählte ich das Kanalmodell von Herrn Santner, da eine Erweiterung der GUI hier ohne weiteres möglich war (siehe Abb. 2.4).

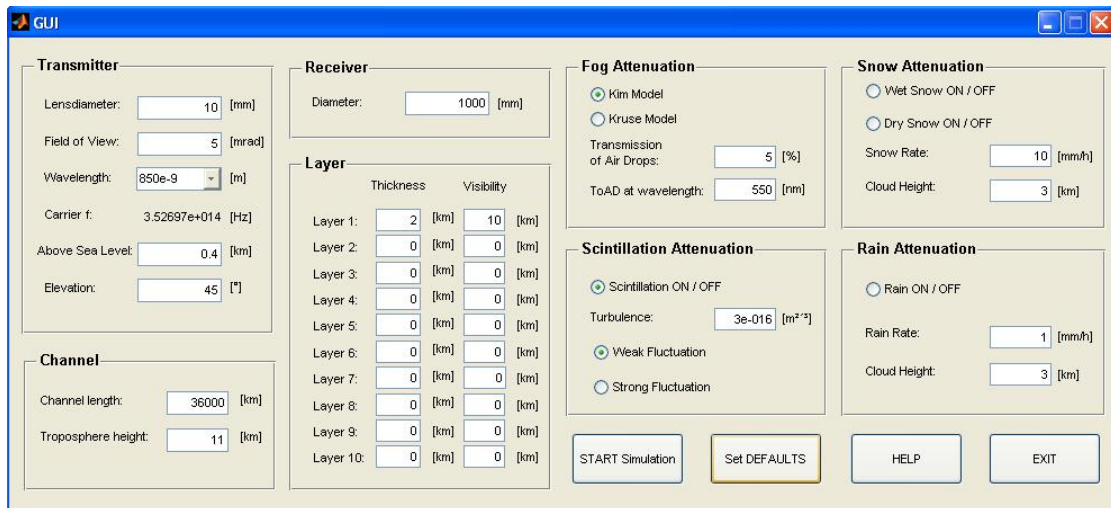


Abbildung 2.4: Benutzeroberfläche des Master-Projekts [4]

### 2.2.2 Motivation für die Erweiterung

Obwohl die Berechnung und Simulation des oben genannten Modells zufriedenstellend war und gute Ergebnisse lieferte hatte es doch den Nachteil, dass alle relevanten Eingaben vom Benutzer selbst eingetragen werden mussten. Das heißt, dass der Benutzer nicht nur über die Daten seiner Sende- und Empfangseinheit Bescheid wissen musste, sondern auch über die atmosphärischen Einflüsse. Da es schwierig und teuer ist an alle benötigten Messdaten zu kommen, entstand die Idee das Kanalmodell mit einer bereits existierenden meteorologischen Datenbank zu verknüpfen. Hierfür wurde die ERA-15 Datenbank ausgewählt. Der Benutzer soll nur noch den Ort und Zeitpunkt der Übertragung, sowie die technischen Daten eingeben müssen. Die atmosphärischen Daten werden dann automatisch in das Programm gelesen und die daraus resultierenden Dämpfungen berechnet.

## 2.3 Die ERA-15 Datenbank

Die ERA-15 Datenbank ist ein Projekt des European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) das im Februar 1993 begonnen und im September 1996 beendet wurde. Hierbei wurde versucht die Wetterdaten von 15 Jahren (1978 - 1992) zu rekonstruieren. Das Ergebnis war eine Reihe von atmosphärischen Parametern für vier Zeitpunkte pro Tag (6 Uhr, 12 Uhr, 18 Uhr und Mitternacht).

```

Parameter list:
=====
Surface parameters:
-----
temp_c ..... Temperature of reference heighth [deg c]
p0 ..... Pressure of reference height [hPa]
vtot ..... Total water vapour content [mm]
rho ..... Vapour density at surface [g/m3]
vap_sch ..... water vapour scale height [km]
ltot ..... Total cloud liquid content [mm]
fcc ..... Fractional cloud cover [0..1]
itot ..... Total cloud ice content [mm]
m_c ..... Convective rain [m]
m_s ..... Large scale rain [m]
n_wet ..... Wet term of refractivity at GND level [ppm]
nwetitu ..... Wet term of refractivity as of ITU-R [ppm]
rliq ..... Reduced liquid water content [g/m3]
tc_top ..... Temperature of cloud tops [K]
tc_bot ..... Temperature of cloud bottoms [K]
h0 ..... 0 deg isotherm height [m]
d_w6 ..... wind direction at 600 hpa level [deg]
d_w7 ..... wind direction at 700 hpa level [deg]
i_w6 ..... wind intensity at 600 hpa level
i_w7 ..... wind intensity at 700 hpa level
c_frac ..... Convective rain fraction [%]
ice_c ..... Ice content conditioned to convective [mm]
ice_s ..... Ice content conditioned to stratiform [mm]
ice_tot ..... Ice content conditioned to total rain [mm]
r_6h ..... Total rain (over 6 hours period) [m]
alfa ..... Temperature lapse rate [K/km]
alfam ..... Mean temperature lapse rate [K/km]
lambda ..... Vapour decay with pressure
lev ..... Number of atmospheric levels for each profile
nlayer ..... Number of cloud layers
p_ms1 ..... Vapour relat. humidity [%]
e_ms1 ..... Vapour pressure at mean sea level [hPa]
tcw ..... Total cloud water [mm]
tk_ms1 ..... Air temperature at mean sea level [K]
tm_ms1 ..... Mean temperature of moist air at mean sea level [K]
twv ..... Total water vapour [mm]
sn ..... Snow water equivalent [m]

Layer parameters:
-----
cl_bot ..... Height of cloud bottom layer - max. 10 layers
cl_top ..... Height of cloud top layer - max. 10 layers

Profile parameters:
-----
temp_c_prof ... Temperature profile [deg C] - max. 79 levels
pr_prof ..... Pressure profile [hPa] - max. 80 levels
h_prof ..... Height profile [m]
lw_prof ..... Liquid water profile [g/m3]
relh_prof ..... Vapour relative humidity [%]
spec_h_prof ..... Specific humidity profile [kg/kg]
sw_prof ..... Solid water profile [g/m3]
tempm_k_prof .. Mean Temper. prof. in moist air [K]
uwv_prof ..... N-S wind velocity [m/s]
vwv_prof ..... W-E wind velocity [m/s]
vapd_prof ..... Vapour density profile [g/m3]
vap_r_prof ..... Vapour pressure profile [hPa]
Temperature of reference heighth [deg c]

```

Abbildung 2.5: Datensatz des ERA-15 Projekts

Der ERA-15 Datensatz umfasst 52 Parameter von Windgeschwindigkeit, über Temperaturen bis hin zur Luftfeuchtigkeit (siehe Abb. 2.5). Dabei werden die Parameter in surface parameter, layer parameter und profile parameter aufgeteilt. Die surface parameter beinhalten nur einen Wert und gelten für die Oberfläche, während die anderen beiden Parameter Typen 10 bzw. 80 Level umfassen. Dies bedeutet aber nicht, dass auch jeder



Level einen gültigen Wert enthalten muss. Die meisten Parameter beinhalten Werte von dem Zeitpunkt an dem gemessen wurde. Die Ausnahme bildet hier der Parameter `r_6h`, der die Menge an Regen über einen Zeitraum von sechs Stunden angibt. Zur Berechnung der Dämpfungen bei der Übertragung wurden allerdings nur ein paar dieser Parameter benötigt (siehe Tabelle 2.1).

Parameter	Beschreibung	Einheit	Typ	benötigt für
<code>r_6h</code>	Total rain (over 6 hours period)	[ <i>m</i> ]	surface	Regen
<code>tk_msl</code>	Air temperature at mean sea level	[ <i>K</i> ]	surface	Schnee
<code>sn</code>	Snow water equivalent	[ <i>m</i> ]	surface	Schnee
<code>rliq</code>	Reduced liquid water content	[ <i>g/m</i> <sup>3</sup> ]	surface	Regen, Schnee
<code>h_prof</code>	Height profile	[ <i>m</i> ]	profile	Visibility
<code>lw_prof</code>	Liquid water profile	[ <i>g/m</i> <sup>3</sup> ]	profile	Visibility

Tabelle 2.1: Zur Berechnung benötigte Parameter

## 3 Grundlegende Beziehungen der Wetterparameter

Bei der Berechnung der Dämpfungen für eine gewünschte Übertragungsstrecke muss das Programm intern zwei Phasen durchlaufen. Zuerst werden die benötigten Parameter geladen und so umgeformt, dass sie danach in die Formeln zur Berechnung der eigentlichen Dämpfungen eingesetzt werden können.

### 3.1 Verarbeitung der ERA-15 Daten

Welche Parameter der ERA-15 Datenbank für die Berechnung verwendet werden, wurde bereits in Kapitel 2.3 beschrieben. In diesem Kapitel soll gezeigt werden, wie diese Parameter genutzt wurden, um sie später in die Dämpfungsformeln einzusetzen.

#### 3.1.1 Regen

Zur Berechnung der Dämpfung durch Regen wird vor allem die Regenrate in  $mm/h$  benötigt. Der Parameter den man dazu am ehesten nutzen kann, ist der Parameter  $r\_6h$ . Er gibt die Menge an Regen in  $m$  zurück, die innerhalb einer Dauer von 6 Stunden gefallen ist. Genau das stellt nun aber ein Problem dar. Da sich sowohl die restlichen Parameter wie auch die Berechnung selbst auf einen bestimmten Zeitpunkt beziehen, werden Momentanwerte benötigt. Der Benutzer möchte schließlich die Dämpfung von dem, von ihm eingestellten Zeitpunkt wissen. Leider gibt es keine Möglichkeit anhand des Parameters festzustellen, zu welchem Zeitpunkt wie viel Regen fiel. Es wäre möglich, dass es 6 Stunden lang gleichmäßigen Regen gab, aber es besteht genauso die Möglichkeit, dass es nur kurze Zeit, dafür aber sehr stark geregnet hat. Es musste also eine Abschätzung vorgenommen werden, wie sich der Regen am ehesten verhält.

In Abb. 3.1 wurden drei Möglichkeiten simuliert wie man den Parameter  $r\_6h$  am besten als Momentanwert verwenden könnte. Die erste Möglichkeit (blaue Linie) zeigt, wie sich die Dämpfung in  $dB/km$  verhalten würde, wenn man die gesamte Regenmenge einfach durch sechs, also durch die Anzahl der gemessenen Stunden dividieren würde. Man ginge also von einem gleichmäßigen Regen über die gesamte Messzeit aus. Im zweiten Fall (rote Linie) wird angenommen, dass die gesamte Regenmenge innerhalb einer Stunde gefallen ist und es danach zu regnen aufgehört hätte. Die dritte Möglichkeit (grüne Linie) ist eher

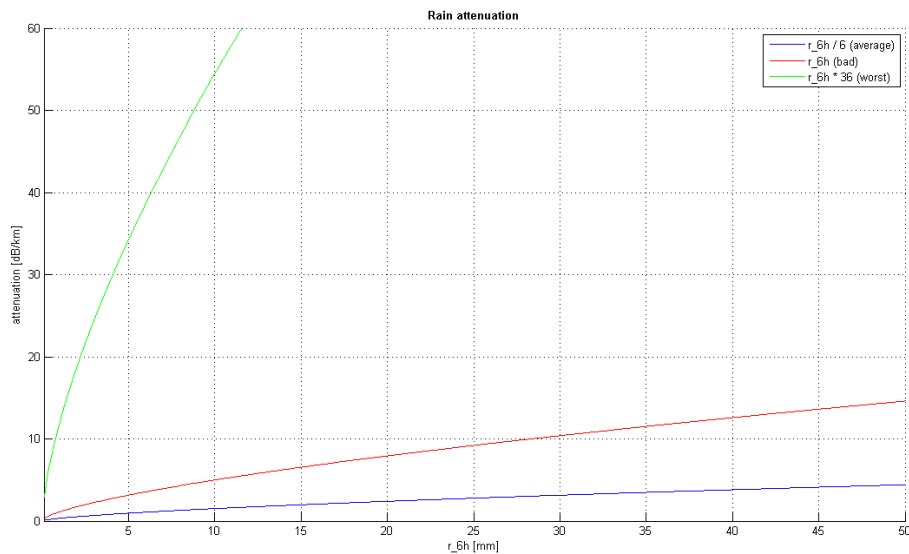


Abbildung 3.1: Verwendungsmöglichkeiten des Parameters r\_6h

theoretischer Natur. Da zur Berechnung des Regens die Regenrate benötigt wird wurde hier auf ihre Definition zurückgegriffen.

*Die Regenrate ist die Regenmenge der letzten 10 Minuten, hochgerechnet auf eine Stunde.*

Es wurde also angenommen, dass die gesamte Regenmenge in den ersten 10 Minuten fiel und dann auf eine Stunde hochgerechnet. Auf Grund von Erfahrungswerten kann diese dritte Variante aber ausgeschlossen werden. Die beiden anderen Möglichkeiten sind durchaus realistisch. Um dem Benutzer möglichst viel Spielraum zu lassen wurden beide Varianten implementiert. Auf der grafischen Benutzeroberfläche kann man sich nun zwischen der ersten Variante („Average Case“) und der zweiten Variante („Worst Case“) entscheiden. Dabei wurde der Parameter r\_6h im Programm wie folgt übernommen:

$$\text{Average Case [mm/h]} = \frac{r_{6h} \cdot 1000}{6} \quad (3.1)$$

$$\text{Worst Case [mm/h]} = r_{6h} \cdot 1000 \quad (3.2)$$

Zu erwähnen ist, dass es wegen dieser „Schätzung“ bereits an dieser Stelle zu kleinen Ungenauigkeiten in der Berechnung kommt, die leider auf Grund des vorliegenden Parameters nicht verhindert werden können.

Es tritt allerdings noch ein zweites Problem in diesem Zusammenhang auf. Man kann an Hand des Parameters `r_6h` nicht erkennen ob es zum gefragten Zeitpunkt überhaupt geregnet hat. Es gibt durchaus Fälle in denen zwar innerhalb der 6 Stunden eine gewisse Regenmenge gemessen wurde, aber zu dem Zeitpunkt der für den Benutzer von Interesse ist kann es trocken gewesen sein. Dieses Problem lässt sich aber mit dem Parameters `rliq` lösen. Denn wenn es geregnet hat muss auch der Parameter `rliq` einen messbaren Wert haben. `rliq` gibt den liquid water content an der Oberfläche bis auf vier Nachkommastellen an. Ist dieser Wert null, hat es zu diesem Zeitpunkt nicht geregnet hat.

#### 3.1.2 Schnee

Beim Schnee ist die Schneerate der entscheidende Faktor um die Dämpfung zu berechnen. Um festzustellen welche Parameter zur Berechnung der Schneerate benötigt werden ist es interessant sich anzusehen welche Kriterien entscheidend sind zur Unterscheidung von Regen und Schnee. In Tabelle 3.1 wurden die Merkmale zusammengefasst. Intuitiv kommt dafür natürlich die Temperatur in Frage. Die allein ist aber noch nicht aussagekräftig genug, da sich das Wetter nicht strikt an die  $0^{\circ}\text{C}$  Linie hält. Tatsächlich kann es bereits bei leichten Plusgraden Schnee geben. Es wird also ein weiteres Merkmal benötigt um zwischen Schnee und Regen zu unterscheiden. Dieses Merkmal ist der Eisgehalt [13]. Bei einem Eisgehalt von 50 % oder mehr handelt es sich um eine Schneeflocke, unter 50 % verhält sie sich eher wie ein Regentropfen. Allerdings ist es nicht nötig sich den Eisgehalt auszurechnen, da es den Parameter `sn` (Snow water equivalent) in `m` gibt. Dieser zeigt die Schneereignisse an und aus ihm kann man die Schneerate in `mm/h` gewinnen.

	Temp. [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Eis [%]	LWC [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]
Regen	$> 0$	$< 50$	$> 0$
nasser Schnee	–	$> 50$	$> 0,3$
trockener Schnee	$< 0$	$> 50$	$0 < LWC \leq 0,3$

Tabelle 3.1: Unterscheidung zwischen Regen und Schnee

Aber auch Schnee ist nicht gleich Schnee. Es gibt zahlreiche Kriterien um verschiedene Arten von Schnee zu unterscheiden, die jeweils anders zusammengesetzt sind und sich unterschiedlich verhalten. In diesem Programm wird zwischen zwei wesentlichen Arten von Schnee unterschieden, nasser Schnee und trockener Schnee. Eine genauere Erklärung zu diesen beiden Arten von Schnee gibt es in Kapitel 3.2.4. An dieser Stelle sei nur erwähnt, dass der große Unterschied der Flüssigkeitsgehalt der Flocken ist [14] und dieser durch den Parameter `rliq` ermittelt werden kann. Nasser Schnee beinhaltet mehr Flüssigkeit und verhält sich daher eher wie Regen, als der trockenere Schnee, der nur bei tieferen Temperaturen vorkommt [15].

### 3.1.3 Wolken

Über die Wolkenschichten Bescheid zu wissen ist aus zwei Gründen wichtig. In erster Linie verursachen sie starke Dämpfungen des Übertragungssignals durch die Verringerung der Sichtweite. Da es zu sehr starken Verlusten bis hin zu einer Unterbrechung der Übertragungsstrecke kommen kann, sind Wolken bzw. Nebel die wichtigsten Faktoren für die Berechnung der Dämpfung. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass Nebel und Wolken in dieser Simulation gleich behandelt und somit dieselben Formeln verwendet werden. Ebenso wird nicht zwischen verschiedenen Wolkenarten unterschieden.

Der zweite Grund warum Wolken wichtig für die Berechnung sind steht im Zusammenhang mit Regen bzw. Schnee. Da die Wolken angeben bis in welche Höhe ein Regen- oder Schneereignis stattfindet. Dazu aber noch im Kapitel 3.2.3 mehr.

Um festzustellen ob es Wolken gibt und wo sie sich befinden benötigt man die beiden Profilparameter  $h\_prof$  und  $lw\_prof$ . Der eine Parameter gibt die Meereshöhe an und der andere das dazugehörige liquid water content (LWC). Auf diese Weise geht das Programm alle Schichten durch und schaut, wo der Wassergehalt einen größeren Wert als Null besitzt. An diesen Stellen muss sich entweder Nebel oder eine Wolke befinden.

### 3.1.4 Visibility

Die Visibility wird benötigt um in Folge die Dämpfung durch Nebel oder Wolken zu berechnen. Gleichzeitig ist die Berechnung der Visibility mit Hilfe der ERA-15 Parameter die größte Herausforderung innerhalb des Programms. Ansätze zur Berechnung gäbe es einige, doch sind viele davon auf Grund der limitierten zur Verfügung stehenden Parameter nicht durchführbar. Es gibt aber drei Ansätze die realisierbar und vielversprechend wirken. Sie sind alle von I. Gulpepe [16] und beziehen sich in ihrer Berechnung auf den Wassergehalt und der droplet number concentration ( $N_d$ ) bzw. nur dem Wassergehalt. Bei den ersten beiden Ansätzen wurde  $N_d$  mit einem Forward Scattering Spectrometer Probe (FSSP) gemessen und daraus der Wassergehalt berechnet. Die beiden Bezeichnungen  $LWC_{96}$  und  $LWC_{124}$  ergeben sich aus verschiedenen Einstellungsmöglichkeiten des FSSP.

$$LWC_{96} = 1 \times 10^{-6} N_d^2 + 0,0014 N_d \quad (3.3)$$

$$LWC_{124} = 3 \times 10^{-7} N_d^2 + 0,0009 N_d \quad (3.4)$$

Hat man dann die beiden Parameter LWC und  $N_d$  werden diese dann in die eigentliche Formel für Die Visibility eingesetzt.

$$Vis = \frac{1,002}{(LWC \cdot N_d)^{0,6473}} \quad (3.5)$$

### 3.1 Verarbeitung der ERA-15 Daten

Im Fall der ERA-15 Datenbank ist es so, dass zwar Daten zum LWC vorhanden sind, aber keine für  $N_d$ . Formt man die beiden Gleichungen 3.3 und 3.4 so um, dass man  $N_d$  daraus errechnet, hätte man alle benötigten Parameter und könnte sie in die Formel 3.5 einsetzen.

Der dritte Ansatz benötigt nur den Parameter LWC zur Berechnung, was sich insofern anbieten würde, da so in der Formel nur vorhandene Werte verwendet werden und keine berechneten Werte vorkommen, die eventuelle Ungenauigkeiten aufweisen.

$$Vis_{Obs} = 0,0219LWC^{-0,9603} \quad (3.6)$$

In Abb. 3.2 wurden knapp über 1000 Messdaten von Nebelereignissen aus Prag aufgetragen, die mir von meinem Kollegen Muhammad Saeed Khan zur Verfügung gestellt wurden, um die berechneten Werte mit realen Messergebnissen zu vergleichen. Anhand dieser Abbildung sollte gezeigt werden, welche der oben genannten Formeln sich am besten zur Implementierung im Kanalmodell eignen würde. Die Messdaten wurden an drei Nebeltagen im Jänner, Februar und April 2009 aufgenommen und geben für je einige Stunden im Minutentakt Werte aus. Die Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen Visibility in  $m$  und LWC in  $g/m^3$ . Werte für  $N_d$  wurden bei diesen Messungen leider nicht aufgenommen. Was aber sofort bei Betrachtung dieser Messdaten klar wird ist, dass Visibility auf jeden Fall von mehr als nur dem Wassergehalt abhängt. So wurden für denselben Wassergehalt oft die unterschiedlichsten Werte für Visibility gemessen (siehe Tabelle 3.2).

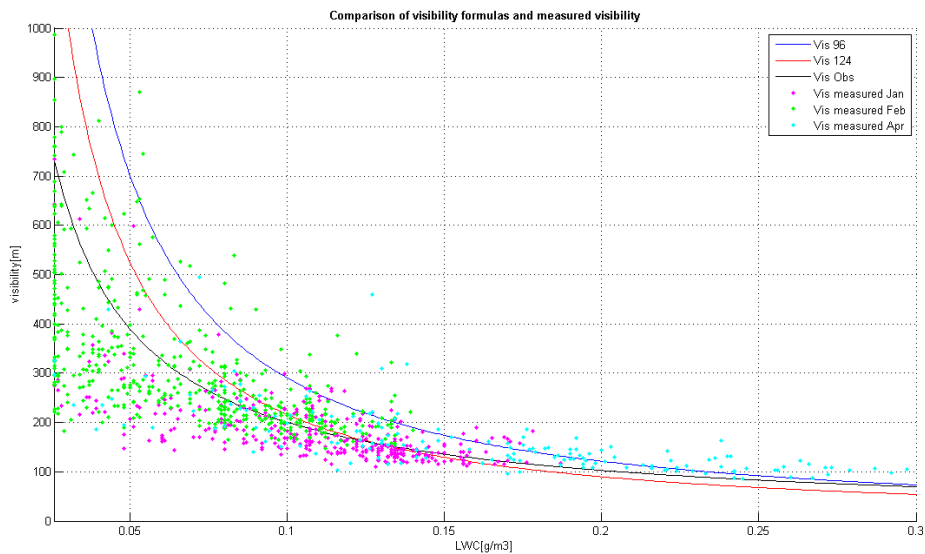


Abbildung 3.2: Vergleich der Visibility Modelle mit Messdaten

Zeitpunkt	Visibility [ $m$ ] bei einem LWC von $0,026 \text{ g/m}^3$
20.01.2009 23:01	642
20.01.2009 23:03	734
21.01.2009 04:54	275
07.02.2009 02:16	638
07.02.2009 02:22	488
07.02.2009 02:23	451
07.02.2009 02:30	472
07.02.2009 02:37	421
07.02.2009 03:23	372
07.02.2009 03:36	483
07.02.2009 03:37	439
07.02.2009 03:38	295
07.02.2009 03:39	282
07.02.2009 03:49	221
07.02.2009 04:01	503
07.02.2009 04:02	417
07.02.2009 04:03	510
...	...

Tabelle 3.2: Unterschiedliche Messwerte für Visibility bei gleichem LWC

Es ist schade, dass bei diesen Messdaten nicht noch mehr Parameter aufgenommen wurden, an Hand derer man vielleicht erkennen hätte können welche Parameter für diese starken Schwankungen der Visibility noch mitverantwortlich sind. Der Parameter  $N_d$  wäre auf jeden Fall noch wichtig gewesen, da Gultepe bereits zeigte, dass ein steigendes  $N_d$  eine Verringerung der Visibility bewirkt [17]. Trotzdem bin ich froh, dass ich mit diesen Messdaten arbeiten konnte, da es sehr schwierig ist an Messergebnisse im Bereich der Visibility heran zu kommen.

Um besser entscheiden zu können welche der drei Formeln auf Grund dieser Messungen am besten für das Kanalmodell geeignet ist, wurden die verschiedenen Messwerte gemittelt und in Abbildung 3.3 noch einmal dargestellt. Außerdem wurde für jeden Wassergehalt (im Bereich zwischen  $0.025 \text{ g/m}_3$  und  $0.300 \text{ g/m}_3$ ) die berechnete Visibility mit dem gemittelten Messwert verglichen. Die durchschnittliche Abweichungen der Visibility in Meter wurden in Tabelle 3.3 aufgelistet. Dabei konnte gezeigt werden, dass auf Grund der vorhandenen Messdaten die Formel 3.6 am geeignetsten ist.

## 3.2 Im Modell implementierte Formeln

Bisher ging es darum wie man die Parameter der ERA-15 Datenbank nützen kann um daraus Dämpfungen auszurechnen. Im folgenden Abschnitt wird auf die dazu notwen-

### 3.2 Im Modell implementierte Formeln

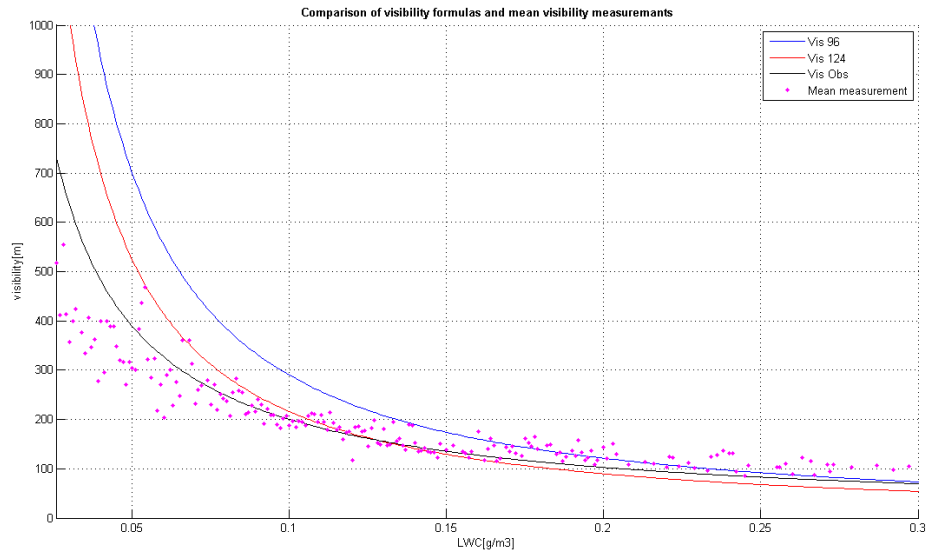


Abbildung 3.3: Vergleich der Visibility Modelle mit gemittelten Messdaten

	$LWC < 0,1$	$0,1 \leq LWC < 0,2$	$0,2 \leq LWC < 0,3$	Gesamtabweichung
$LWC_{96}$	345,5 [m]	37 [m]	<b>16,7</b> [m]	146,1 [m]
$LWC_{124}$	183,6 [m]	21,1 [m]	40,4 [m]	84,2 [m]
$LWC_{obs}$	<b>72,6</b> [m]	<b>17,3</b> [m]	25,8 [m]	<b>39,1</b> [m]

Tabelle 3.3: Abweichung der berechneten Visibility zu den gemittelten Messwerten



digen Formeln eingegangen. Zu den oben erwähnten dämpfenden Effekten wie Regen, Schnee, Nebel und Wolken kommen nun noch Szintillation und geometrische Verluste dazu.

### 3.2.1 Geometrische Verluste

Zuerst sollen hier die geometrischen Verluste betrachtet werden. Sie sind die einzigen Verluste die unabhängig von Wetterbedingungen und auch noch außerhalb der Atmosphäre auftreten. Die Größe der Dämpfung hängt einzig von der Beschaffenheit des Senders, des Empfängers und der Länge der Übertragungsstrecke ab. Beim Sender sind die Strahldivergenz und der Linsendurchmesser entscheidend, beim Empfänger nur der Linsendurchmesser. Ursache für die Art der Verluste ist die Tatsache, dass Laser das Licht zwar gut bündeln, aber dennoch eine gewisse Strahlaufweitung besitzen. Auch wenn diese Aufweitung sehr gering ist, so kann sie sich auf die große Distanz, beispielsweise zwischen einer Bodenstation und einem Satelliten, doch erheblich auswirken. Das Problem ist, dass sich der Strahl beim Empfänger so sehr aufgeweitet hat, dass er breiter ist als die Empfangsoptik. Dadurch kann nicht mehr die gesamte Information vom Empfänger aufgenommen werden und es kommt zu Verlusten. Verringern kann man diese Verluste, indem man den Linsendurchmesser so weit erhöht, dass trotzdem alle Informationen empfangen werden können. Ist der Empfänger, wie vorhin genannt, ein Satellit, so ist man allerdings limitiert und man wird die Empfangsoptik allein auf Grund der hohen Kosten nicht beliebig vergrößern können.

Im Programm wird die Gleichung 3.7 verwendet, um die geometrischen Verluste zu simulieren [2]. In den Grafiken wird man in den meisten Fällen sehen, dass sich die Dämpfung erst ab einer gewissen Distanz auswirkt, da bis zu diesem Punkt die Linsendurchmesser groß genug dimensioniert sind. Erst wenn der Stahl breiter als die Linse des Empfängers ist gehen die geometrischen Verluste in die Simulation ein.

$$a_{geo} = 20 \cdot \log \frac{d_1 + D \cdot l}{d_2} \quad (3.7)$$

$a_{geo}$	... geometrische Dämpfung	[dB]
$d_1$	... Linsendurchmesser des Senders	[m]
$d_2$	... Linsendurchmesser des Empfängers	[m]
$D$	... Strahldivergenz	[mrad]
$l$	... Kanaldistanz	[km]

### 3.2.2 Nebel-/Wolkenverluste

In Kapitel 3.1.4 wurde gesagt, dass Visibility einer der wichtigsten Parameter ist, da er zur Berechnung der Dämpfungen benötigt wird, die durch Nebel und Wolken verursacht

werden. Warum gerade diese Wettererscheinungen für die optische Freiraumübertragung so entscheidend ist, und nicht etwa Regen wie bei Funkübertragungen, liegt daran, dass deren Partikelgröße und die Wellenlänge des verwendeten Lichts (750 nm - 1550 nm) in einem solchen Verhältnis stehen, in dem der Einfluss der Störpartikel an Bedeutung zunimmt und es zu Dämpfungen des Signal kommt. In diesem Simulationsmodell wird angenommen, dass sich Nebel und Wolken gleich verhalten. Nebel wird als eine Wolke mit Bodenkontakt betrachtet. Allerdings sind die Tröpfchen im Nebel generell kleiner als in Wolken, was sich in einem kleineren Wert für das Liquid Water Content auswirkt. Für Nebel bewegt sich dieser Wert im Bereich von 0.01 bis 0.4  $g/m_3$  [18]. Natürlich kennt die Meteorologie eine Vielzahl von unterschiedlichen Nebelarten [19] und Wolkentypen [20], doch werden diese in der Berechnung als gleich angenommen.

Nebelarten: - Strahlungsnebel  
- Advektionsnebel  
- Orografischer Nebel  
- Verdunstungsnebel  
- Mischungsnebel  
- Eisnebel etc.

Wolkenarten: - Stratocumulus (0-2 km)  
- Stratus (0-2 km)  
- Altocumulus (2-6 km)  
- Altostratus (2-6 km)  
- Cirrus (6-12 km)  
- Cirrostratus (6-12 km)  
- Cirrocumulus (6-12 km)  
- Cumulus (0-12 km)  
- Cumulonimbus (0-12 km)  
- Nimbostratus (0-12 km)

Gleichung 3.8 zeigt wie die Dämpfung auf Grund von Nebel oder Wolken berechnet werden kann [2]. Die Visibility ist dabei ein wichtiger Parameter. Referenzsichtweite und Referenzwellenlänge beziehen sich auf ein Transmissiometer. Die Definition der Sichtweite lautet:

*Sichtweite ist die Distanz, bei jener der Wert des Übertragungssignals auf den Wert von 2% oder 5% ( $V_{\%}$ ) des Wertes bei klarem Himmel fällt.*

Die Einstellungen für den Transmissiometer können auf der grafischen Benutzeroberfläche des Programms eingegeben werden. ein typischer Wert für  $\lambda_0$  ist 550 nm und für  $V_{\%}$  5% (2% wird heute kaum noch verwendet).

$$a_{vis} = \frac{10 \cdot \log V_{\%}}{V_{km}} \cdot \left( \frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-q} \quad (3.8)$$

$a_{vis}$	... Dämpfung durch Nebel bzw. Wolken	[dB/km]
$V_{km}$	... Visibility	[km]
$V_{\%}$	... Referenzsichtweite des Transmissiometers	[%]
$\lambda$	... Wellenlänge des Signals	[nm]
$\lambda_0$	... Referenzwellenlänge	[nm]
$q$	... Dämpfungskoeffizient für das Kim bzw. Kruse Modell	

Der Faktor  $q$  ist ein Dämpfungsfaktor der je nach verwendetem Modell anders definiert ist. Die beiden bekanntesten Modelle sind die von Kim und Kruse.

#### Kim / Kruse Modell

Wie oben erwähnt handelt es sich bei den beiden Modellen von Kim [21] und Kruse [22] um die bekanntesten Arten wie man Dämpfungen auf Grund von Nebel oder Wolken berechnen kann. Den Unterschied macht dabei nur der Faktor  $q$ . Dieser wird je nach der Größe der Visibility in der Formel angepasst. Paul Kruse machte im Jahr 1962 erstmals eine solche Einteilung. Er definierte dabei drei verschiedene Werte für  $q$ , abhängig davon ob die Visibility unter 6 km zwischen 6 km und 50 km oder über 50 km beträgt (siehe Gleichung 3.9).

$$q = \begin{cases} 1,6 & \text{wenn } V > 50 \text{ km} \\ 1,3 & \text{wenn } 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0,16 \cdot V + 0,34 \cdot V & \text{wenn } V < 6 \text{ km} \end{cases} \quad (3.9)$$

Isaac Kim fügte 2001 zwei weitere Unterteilungen für kleinere Visibility hinzu, um im Bereich kürzerer Sichtweiten genauere Ergebnisse zu erhalten (siehe Gleichung 3.10).

$$q = \begin{cases} 1,6 & \text{wenn } V > 50 \text{ km} \\ 1,3 & \text{wenn } 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0,585 \cdot V^{1/3} & \text{wenn } 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km} \\ V - 0,5 & \text{wenn } 0,5 \text{ km} < V < 1 \text{ km} \\ 0 & \text{wenn } V < 0,5 \text{ km} \end{cases} \quad (3.10)$$

In Abbildung 3.4 wurden die beiden Modelle für unterschiedliche Visibility und den beiden Wellenlängen 1550 nm und 10  $\mu$ m simuliert. Es wurde nur der Bereich bis 4 km berücksichtigt, da sich hier die größten Unterschiede zeigen. Ab 6 km gleichen sich die Kurven an und darüber hinaus verhalten sie sich identisch.

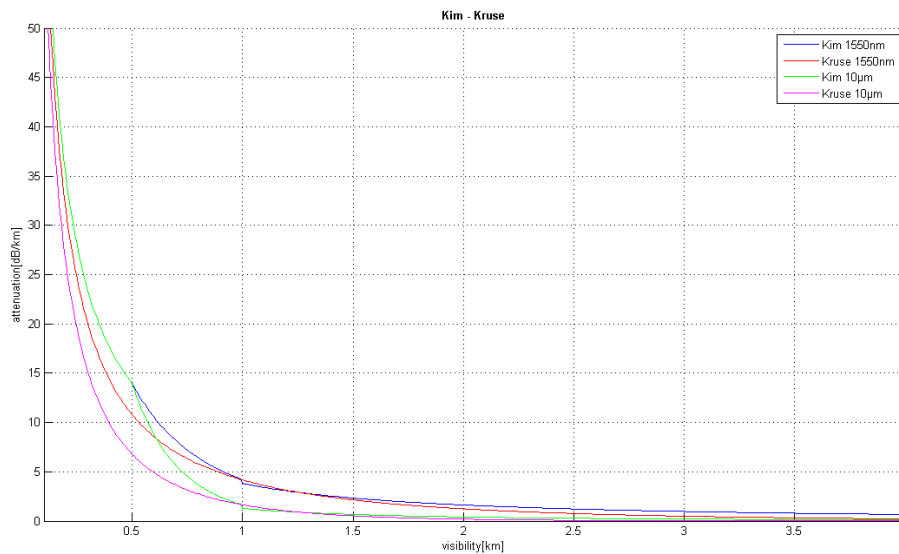


Abbildung 3.4: Vergleich der beiden Modelle von Kim und Kruse

#### 3.2.3 Regenverluste

Ein weiterer atmosphärischer Effekt, der zu Verlusten entlang der Übertragungsstrecke führt ist Regen. Regen verursacht bei optischen Übertragungen allerdings viel geringere Verluste als bei Funkübertragungen. Der Grund dafür ist die verwendete Wellenlänge, da Regentropfen einen Durchmesser von 0,1 mm bis 5 mm haben, die Wellenlänge in der optischen Freiraumübertragung aber im Nanometerbereich liegt. Zur Berechnung der Dämpfung wird im Programm die Formel 3.11 verwendet. Sie bezieht sich bei der Berechnung auf die Regenmenge. Um ein exaktes Ergebnis zu erhalten, müsste man noch viel mehr Parameter einbeziehen, wie zum Beispiel die Tropfengröße, die Fallgeschwindigkeit, die Windgeschwindigkeit, die Windrichtung, die Deformation der Tropfen, sowie deren Neigung. Da einige Parameter für die Berechnung aber nicht zur Verfügung stehen wurde auf die unten angeführte Formel zurückgegriffen [23].

$$a_{rain} = 1,076 \cdot R^{2/3} \tag{3.11}$$

$a_{rain}$	...	Regenverluste	[dB/km]
$R$	...	Regenmenge	[mm/h]

Die Formel berechnet die Dämpfung in dB/km. Um die Verluste über die gesamte Strecke zu erfahren, muss man wissen welche Distanz im Regen durchlaufen wird. Deswegen wird ermittelt in welcher Höhe sich die Regenwolke befindet. Dies passiert wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben mit den beiden ERA-15 Parametern  $h\_prof$  und  $lw\_prof$ . Das Programm

sieht nach auf welcher Höhe der erste messbare Wert für den Wassergehalt vorkommt. Wurde die Höhe der Wolke gefunden, wird die Distanz ausgerechnet, die das Signal im Regen durchläuft.

$$\text{Distanz} = \text{Wolkenhöhe} - \text{Senderhöhe}$$

Außerdem muss bei der Berechnung der Distanz noch der Übertragungswinkel berücksichtigt werden, sollte er weniger als  $90^\circ$  betragen. Zuletzt muss man noch  $a_{rain}$  in [dB/km] mit der Distanz multiplizieren, um die tatsächlichen Verluste durch Regen zu erhalten. In der Abbildung 3.5 wird veranschaulicht in welcher Größenordnung sich die Dämpfung durch Regen bei unterschiedlichen Regenmengen verhält.

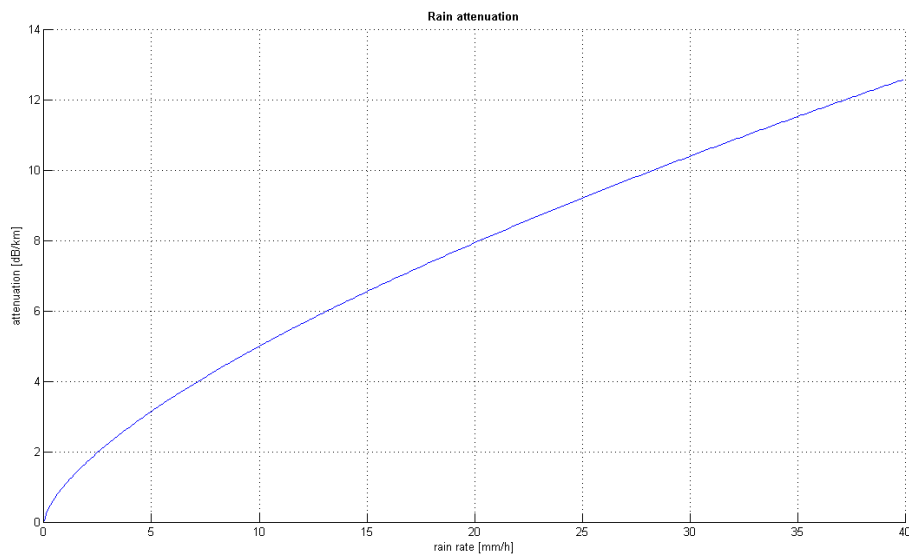


Abbildung 3.5: Dämpfung durch Regen

#### 3.2.4 Schneeverluste

Im Gegensatz zu Regentropfen, kann man bei Schneeflocken nichts über deren Erscheinungsform aussagen, da keine Flocke der anderen gleicht. Aber nicht nur das Aussehen des Schnees macht es schwierig eine exakte Formel zur Berechnung der Dämpfung zu entwickeln, sondern auch seine Zusammensetzung. Je nach Flüssigkeitsgehalt des Schnees wird er in eine Kategorie eingeteilt. Wie in Kapitel 3.1.2 bereits erwähnt, wird der Schnee in diesem Kanalmodell in nassen und trockenen Schnee unterteilt. Es gebe zwar noch Abstufungen, um die Art des Schnees genauer zu beschreiben, doch wird an dieser Stelle nicht genauer darauf eingegangen. Formel 3.12 beschreibt die spezifische Dämpfung von Schnee, wobei  $a$  und  $b$  Dämpfungskoeffizienten sind, die für nassen bzw. trockenen Schnee gesondert eingesetzt werden müssen [23].

$$a_{snow} = a \cdot S^b \quad (3.12)$$

$a_{snow}$	... Dämpfung durch Schnee	$[dB/km]$
$S$	... Schneerate	$[mm/h]$
$a$	... multiplikativer Dämpfungskoeffizient	$[dB \cdot h/m^2]$
$b$	... potentieller Dämpfungskoeffizient	

**Nasser Schnee:**

Nasser Schnee zeichnet sich dadurch aus, dass er einen recht hohen Flüssigkeitsgehalt aufweist und bei Temperaturen in der Nähe des Gefrierpunkts vorkommt. Die von diesem Schnee verursachte Dämpfung ist etwas höher als die Dämpfung durch Regen.

$$a = 5,42 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda + 5,4958776 \quad (3.13)$$

$a$	... multiplikativer Dämpfungskoeffizient	$[dB \cdot h/m^2]$
$\lambda$	... Wellenlänge	$[nm]$

Der potentielle Dämpfungskoeffizient  $b$  ist eine Konstante:  $b = 0,72$

**Trockener Schnee:**

Trockener Schnee tritt nur bei tieferen Temperaturen auf und beinhaltet wenig Flüssigwasser. Die Dämpfung durch trockenen Schnee ist um ein Vielfaches höher als durch nassen Schnee oder Regen. In der Abbildung 3.6 ist der Unterschied zwischen den Verlusten durch nassen und trockenen Schnee dargestellt.

$$a = 1,023 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda + 3,7855466 \quad (3.14)$$

$a$	... multiplikativer Dämpfungskoeffizient	$[dB \cdot h/m^2]$
$\lambda$	... Wellenlänge	$[nm]$

Der potentielle Dämpfungskoeffizient  $b$  ist auch hier wieder eine Konstante:  $b = 1,38$

**3.2.5 Szintillationsverluste**

Ein weiterer atmosphärischer Effekt, der zu Dämpfungen auf der Übertragungsstrecke führt, ist die Szintillation. Sie entsteht durch Temperaturunterschiede und tritt hauptsächlich in Bodennähe auf. Durch das Aufeinandertreffen unterschiedlicher Temperaturen kommt es zu Turbulenzen in der Luft und es entstehen Trugbilder für das menschliche Auge. Häufig kann man diesen Effekt bei heißem Asphalt beobachten. Für ein optisches Signal wirkt es sich deswegen ungünstig aus, da die Brechungsindizes der Luftschichten

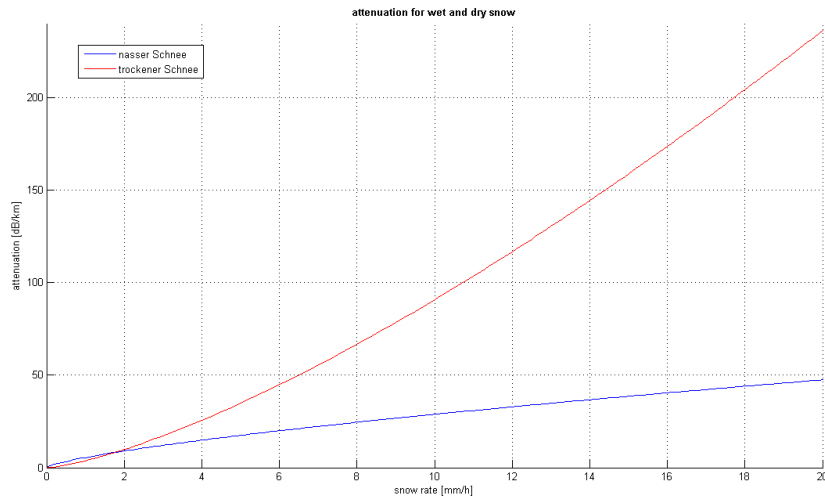


Abbildung 3.6: Dämpfung durch nassen und trockenen Schnee

unterschiedlich sind und dies zu einer Streuung des Signals führt. Wie stark die Turbulenzen sind und damit auch die Dämpfung wird stark von der Tageszeit beeinflusst. Kurz nach Sonnenaufgang bzw. Sonnenuntergang wirkt sich der Effekt auf Grund der kleineren Temperaturunterschiede weniger aus und der Strukturparameter des Brechungsindex  $C_n^2$  hat einen Wert in der Größenordnung von  $10^{-17}$ , während er nachmittags Werte von bis zu  $10^{-13}$  erreichen kann [2]. Im Kanalmodell wurden die folgenden Formeln 3.15 und 3.16 verwendet um die Dämpfung durch Szintillation zu beschreiben. Der Unterschied zwischen den Formeln besteht nur in der Konstante unter der Wurzel. Das liegt daran, dass nicht sicher ist, welcher Wert realistischer ist. Die Wahl der Formel kann der Benutzer des Programms deswegen selbst vornehmen, indem er sich auf der grafischen Benutzeroberfläche zwischen „strong fluctuation“ und „weak fluctuation“ entscheidet [23].

$$a_{scin} = 2 \cdot \sqrt{23,17 \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 10^9\right)^{\frac{7}{6}} \cdot C_n^2 \cdot l^{\frac{11}{6}}} \quad (3.15)$$

$$a_{scin} = 2 \cdot \sqrt{1,23 \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 10^9\right)^{\frac{7}{6}} \cdot C_n^2 \cdot l^{\frac{11}{6}}} \quad (3.16)$$

$a_{scin}$	... Szintillationsverluste	[dB]
$l$	... Kanaldistanz	[m]
$C_n^2$	... Strukturkonstante	[m <sup>-2</sup> ]
$\lambda$	... Wellenlänge	[nm]

### 3.2 Im Modell implementierte Formeln

In der nachfolgenden Abbildung 3.7 ist einerseits zu sehen, wie sich die Formeln 3.15 und 3.16 bei unterschiedlichen Werten für die Strukturkonstante  $C_n^2$  verhalten, als auch der Unterschied zwischen den beiden Formeln selbst. Die in dieser Simulation verwendete Wellenlänge ist 1550 nm.

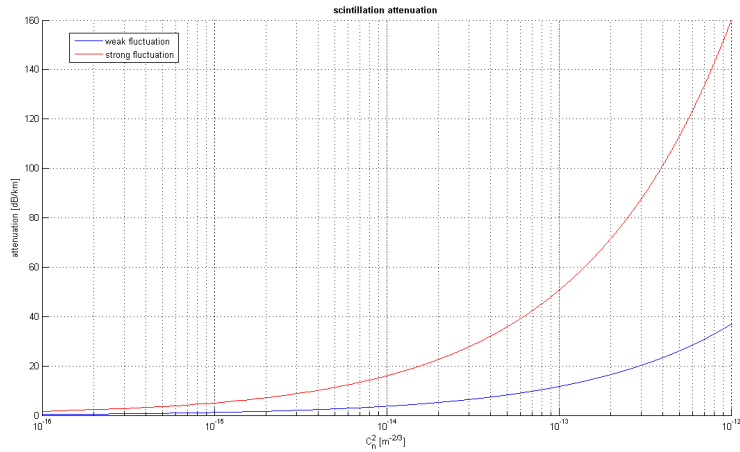


Abbildung 3.7: Szintillationsverluste bei schwachen und starken Fluktuationen

Da die Formeln Frequenzabhängig sind verändern sich die Ergebnisse bei unterschiedlichen Wellenlängen. In Abbildung 3.8 wurde die Formel 3.16 mit unterschiedlichen Wellenlängen simuliert. Dabei kann man sehen, dass mit größerer Wellenlänge die Dämpfung immer geringer wird.

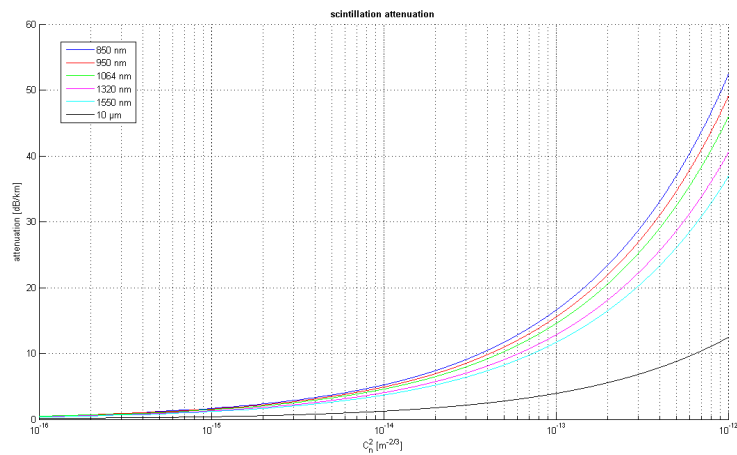


Abbildung 3.8: Szintillationsverluste bei unterschiedlichen Wellenlängen



## 4 Implementierung

Als Entwicklungsumgebung zur Umsetzung des Kanalmodells wurde MATLAB gewählt, da es sich gut für die Berechnung und Darstellung solcher Aufgaben eignet. Das Programm besteht aus insgesamt sechs Dateien. GUI.m ist die Hauptdatei. Mit ihr wird das Programm gestartet und die grafische Benutzeroberfläche (grafical user interface - GUI) aufgerufen. Auch werden hier die Eingaben des Benutzers in Variablen übertragen, die das Programm in Folge verarbeiten kann. Die Dateien calculation.m, statistics.m und simulationYear.m beinhalten die drei verschiedenen Simulationsmöglichkeiten. In der Datei GUI.fig befinden sich die Informationen der Benutzeroberfläche und help.pdf ist eine Datei, die dem Benutzer helfen soll, die Benutzeroberfläche problemlos zu bedienen.

### 4.1 Die grafische Benutzeroberfläche

Um das Programm zu starten muss man in MATLAB den Ordner, der die Programmdateien enthält, als aktuelles Verzeichnis wählen. Dann zieht man entweder die Datei GUI.m in das Befehlsfenster oder gibt dort den Befehl „run GUI“ ein. Danach erscheint die grafische Benutzeroberfläche. In Abbildung 4.1 ist zu sehen wie sie aussieht. Die GUI besteht aus Eingabefeldern, die thematisch in Bereiche aufgeteilt sind, und Knöpfen. Der erste Bereich „Time & Location“ ist dazu da um auf den gewünschten Bereich der ERA-15 Datenbank zugreifen zu können. Diese Daten müssen lokal am Computer gespeichert sein und der Datenpfad muss im entsprechenden Bereich der Benutzeroberfläche eingetragen werden. In den Bereichen „Transmitter“ und „Receiver“ werden die Geräteinformationen eingetragen, „Channel“ enthält Informationen über den Übertragungskanal, „Fog Attenuation“, „Rain“ und „Scintillation Attenuation“ beliefern das Programm mit weiteren Daten zur Berechnung, die aus der ERA-15 Datenbank nicht hervorgehen oder vom Benutzer beliebig gewählt werden können. Es gibt auch noch einen weiteren Bereich mit dem man die Ansicht im Ausgabefenster verändern kann. Außerdem gibt es sechs Knöpfe, die entweder die einzelnen Berechnungen starten, voreingestellte Daten aufrufen, die Hilfe aktivieren oder das Programm beenden.

#### 4.1.1 Time and Location

Innerhalb dieses Bereichs werden die Informationen eingegeben, die benötigt werden, um die Parameter aus der ERA-15 Datenbank auszulesen. Jede Stadt, deren Parameter verfügbar sind, hat ihren eigenen Ordner. Im aktuellen Programm sind die Daten der

## 4.1 Die grafische Benutzeroberfläche

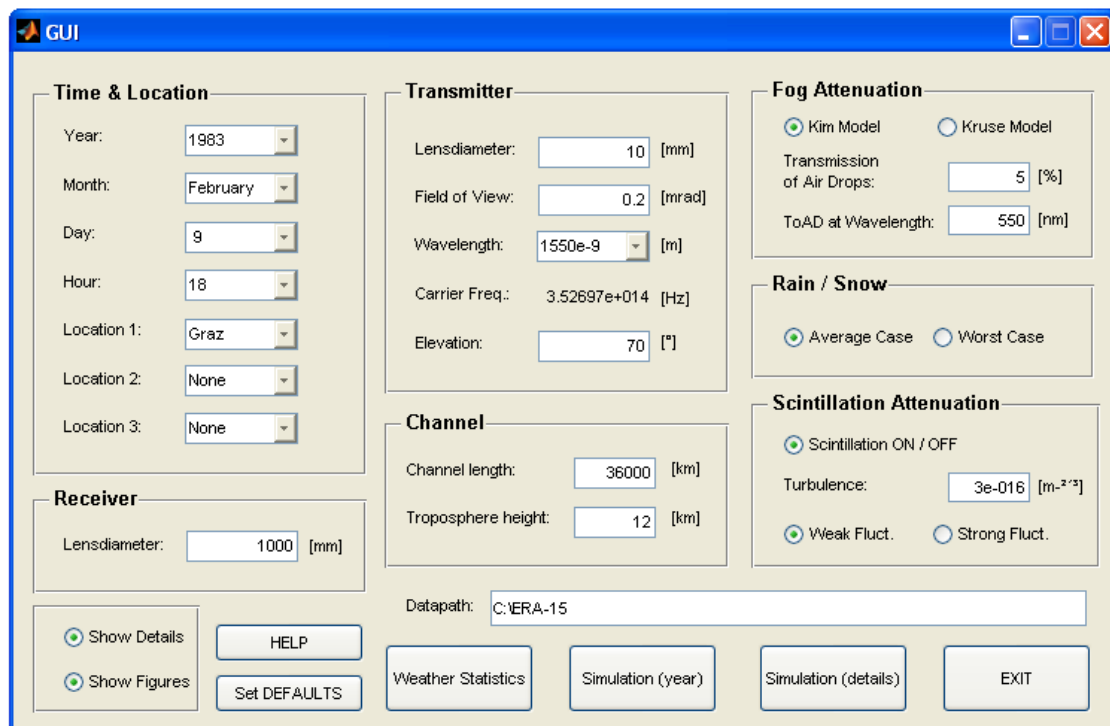


Abbildung 4.1: Die grafische Benutzeroberfläche

Städte Graz, Mailand, Pisa, Nizza und Prag eingebunden. Die Erweiterung auf andere Städte ist jedoch ohne großen Aufwand möglich. **Year:** Die ERA-15 Datenbank enthält Parameter aus 15 Jahren. Dabei beginnen die Daten im Dezember 1978 und enden im Dezember 1992.

**Month:** Wenn man die Benutzeroberfläche nach dem Start betrachtet sieht man nur einen Strich. Das liegt daran, dass standartmäßig das Jahr 1978 eingestellt ist und hier aber nur die Daten für Dezember vorliegen. In den anderen Jahren sind alle Monate verfügbar, wobei 1980, 1984, 1988 und 1992 Schaltjahre waren.

**Day:** Je nachdem welcher Monat eingestellt wurde stehen hier 28 - 31 Tage zur Auswahl.

**Hour:** Die Datenbank ist so aufgebaut, dass sie für vier Zeitpunkte am Tag Daten enthält. Hier kann eingestellt werden, ob man die Daten von Mitternacht, 6 Uhr, Mittag oder 18 Uhr haben möchte.

**Location:** Es gibt drei Möglichkeiten Orte einzugeben. Der erste Ort ist auf jeden Fall auszuwählen, die anderen beiden sind optional. Dadurch ist es möglich die Dämpfungen zweier oder dreier Orte zum gleichen Zeitpunkt zu vergleichen. Lediglich bei der Simulation „Weather Statistics“ ist nur die Auswahl eines Ortes möglich.

Man sollte bei der Eingabe des Zeitpunkts immer mit dem Jahr beginnen und dann der Reihe nach weiter gehen, da sich bei Änderung eines Wertes die darunter befindlichen Kästchen auf den jeweiligen Standardwert zurückstellen.

### 4.1.2 Transmitter Einstellungen

In diesem Bereich können die Parameter des Sendegeräts eingestellt werden. Wird öfters mit denselben Werten gearbeitet, können diese auch voreingestellt werden, so dass das Programm beim Start bereits mit diesen Werten initialisiert wird. Dies wird in Kapitel 5.1 genauer erklärt.

**Lensdiameter:** In diesem Feld wird der Linsendurchmesser der Sendeoptik in mm eingetragen.

**Field of View:** Dieser Parameter gibt den Aufweitungswinkel des Strahls an. Je größer die Aufweitung ist, desto größer ist die Gefahr, dass ein Teil des Signals nicht mehr von der Empfangsoptik aufgenommen werden kann. Der Wert muss in Milliradian angegeben werden.

**Wavelength:** Da nur gewisse Wellenlängen von Interesse sind, sind die Wichtigsten in einer Liste vorgegeben. Der Benutzer muss also nur noch die gewünscht Wellenlänge auswählen. Die vorgegebenen Wellenlängen sind: 850 nm, 950 nm, 1059 nm, 1064 nm, 1320 nm, 1550 nm und 10  $\mu\text{m}$ . Das Hinzufügen einer weiteren Wellenlänge ist ohne weiteres möglich. Man muss nur den Befehl „guide“ im Befehlsfenster eingeben und danach die Datei GUI.fig im Bereich „Open existing GUI“ auswählen. Dann erscheint die

Entwicklungsumgebung der grafischen Benutzeroberfläche. Mit einem Doppelklick auf das Kästchen mit den Wellenlängen öffnet sich der „Property Inspector“. Beim Parameter „String“ befindet sich die Liste der Wellenlängen, die hier beliebig erweitert werden kann.

**Carrier Frequency:** Die Trägerfrequenz kann nicht von Hand eingegeben werden, da sie unter Berücksichtigung der Wellenlänge automatisch berechnet wird.

**Elevation:** Mit diesem Wert kann man den Winkel für die Übertragungsstrecke einstellen. Dadurch sind nicht nur terrestrische Übertragungen, sondern auch Verbindungen zwischen Bodenstationen und Satelliten möglich. Der Parameter wird in Grad angegeben, wobei 90° einer senkrecht nach oben gerichteten Übertragung gleichkommen würde.

### 4.1.3 Receiver Einstellungen

In diesem Bereich ist lediglich die Eingabe eines Parameters erforderlich. Auf andere Parameter wird verzichtet, da der Linsendurchmesser die wichtigste Einstellung des Empfängers angibt.

**Lensdiameter:** Dieser Wert beschreibt den Linsendurchmesser der Empfangsoptik. Die Eingabe erfolgt in mm.

### 4.1.4 Kanaleinstellungen

Hier werden die benötigten Parameter zur Beschreibung des Übertragungskanals angegeben.

**Channel length:** Dieser Wert gibt die Länge der Übertragungsstrecke in Kilometer an. Möglich sind in diesem Programm Distanzen von wenigen 100 Metern bis zu mehreren Millionen Kilometern.

**Troposphere height:** Da sich die Höhe der Atmosphäre je nach Gegend und Jahreszeit verändert, hat der Benutzer hier die Möglichkeit eine Höhe im Bereich zwischen 8 km und 16 km einzustellen.

### 4.1.5 Nebel-/Wolkeneinstellungen

Die eigentlichen atmosphärischen Parameter zur Berechnung von Nebel und Wolken werden der ERA-15 Datenbank entnommen, doch wie diese Daten dann berechnet werden darf der Benutzer entscheiden.

**Kim / Kruse Modell:** Hier hat der Benutzer die Möglichkeit sich zwischen dem Kim und dem Kruse Modell zu entscheiden. Die Beschaffenheit dieser Beiden Modelle wurde bereits in Kapitel 3.2.2 erläutert. Möchte man die Verluste durch Nebel und Wolken bei Seite lassen kann man auch beide Modelle deaktivieren.

**Transmission of Air Drops:** Hier kann die Referenzsichtweite des Transmissiometers in % eingestellt werden (siehe Formel 3.8).

**ToAD at Wavelength:** Dieser Wert gibt die Wellenlänge des Transmissiometers an, bei dem die Sichtweite gemessen wird. Der Wert muss in nm angegeben werden.

### 4.1.6 Regeneinstellungen

**Average / Worst Case:** Da beim Parameter  $r_{6h}$ , der zur Berechnung der Regenrate herangezogen wird, nicht klar ist wie viel Regen wirklich innerhalb einer Stunde gefallen ist, hat der Benutzer hier die Möglichkeit sich zwischen einer durchschnittlichen und einer starken Regenmenge zu entscheiden. Genauer es kann man in Kapitel 3.1.1 nachgelesen werden.

### 4.1.7 Szintillationseinstellungen

Zur Berechnung der Szintillation muss der Benutzer das Programm mit dem benötigten Wert für die Strukturkonstante versorgen, da die ERA-15 Datenbank diesen Wert nicht bereitstellt.

**Scintillation ON / Off:** Auch hier kann sich der Benutzer dafür entscheiden keine Szintillationsverluste berechnen zu wollen. Standardmäßig ist „on“ eingestellt.

**Turbulence:** Hier kann man den Brechungsindex  $C_n^2$  in  $m^{-\frac{2}{3}}$  einstellen. Der gültige Wertebereich liegt zwischen  $10^{-12}$  und  $10^{-21}$ .

**Weak / Strong Fluctuation:** Hinter diesen beiden Einstellungen steckt dieselbe Formel zur Berechnung der Szintillation, lediglich mit einem unterschiedlichen Faktor (siehe Formel 3.15 und Formel 3.16).

### 4.1.8 Sonstige Einstellungen (Features)

**Datapath:** Hier muss der genaue Datenpfad für die ERA-15 Daten eingegeben werden, damit das Programm korrekt auf die Daten zugreifen kann. Angegeben werden muss der Pfad zu dem Ordner, in dem sich die Ordner der einzelnen Orte befinden. Wichtig ist, dass weder diese Ordner, noch die dazugehörigen Unterordner umbenannt werden, da sonst das Laden der Parameter nicht funktioniert.

**Show Details:** Bei der Berechnung werden viele Einzelheiten im Befehlsfenster ausgegeben. Auch wenn es sich dabei um nützliche Informationen handelt, kann es sein, dass man diese Details nicht aufgelistet haben möchte. Auch benötigt das Ausgeben vieler Daten mehr Zeit. Mit dieser Funktion kann man die Ausgabe dieser Details unterdrücken, so dass nur die Ergebnisse dargestellt werden.

**Show Figures:** Ebenso wie die Details können auch die grafischen Darstellungen des Ergebnisses unterdrückt werden.

### 4.1.9 Buttons

**Simulation (details):** Mit diesem Knopf wird die Berechnung gestartet, bei der die Dämpfungen detailliert für einen eingestellten Zeitpunkt, für bis zu drei Orte gleichzeitig ermittelt werden. (siehe Kapitel 4.2.1)

**Simulation (year):** Hier wird die Berechnung gestartet, bei der die gesamte Dämpfung für jeden Tag des eingestellten Jahres, für bis zu drei Orte gleichzeitig ermittelt werden. (siehe Kapitel 4.2.2)

**Weather Statistics:** Startet eine Funktion, die Statistiken wie Regendämpfung, Schneedämpfung, Temperaturen und Wolkendämpfung für einen eingestellten Ort, über den Zeitraum eines Jahres anzeigt. (siehe Kapitel 4.2.3)

**Set Default:** Es ist möglich, dass man gewisse Werte, die öfters verwendet werden, voreinstellt. Mit diesem Knopf können die Voreinstellungen jeder Zeit geladen werden. Die Werte können in den Zeilen 98 bis 143 der Datei GUI.m eingegeben werden. (siehe Kapitel 5.1)

**Help:** Dieser Knopf öffnet eine PDF-Datei in der die wichtigsten Funktionen des Programms erklärt werden.

**Exit:** Schließt das Programm

## 4.2 Die Simulation

Dem Benutzer stehen im Programm drei mögliche Funktionen zur Auswahl. Jede der Funktionen besteht aus einer numerischen Ausgabe, die im Befehlsfenster (Command Window) dargestellt wird und einer grafischen Ausgabe um die Ergebnisse zu visualisieren. Durch die beiden Befehle „Show details“ und „Show figures“ kann auf der grafischen Benutzeroberfläche eingestellt werden, ob die Darstellungen bzw. Teile der numerischen Ausgabe unterdrückt werden sollen.

### 4.2.1 Funktion: Simulation (details)

Diese Funktion ist das eigentliche Kernstück des Programms. Hat man den gewünschten Zeitpunkt in der Benutzeroberfläche eingegeben, werden für diesen alle atmosphärischen Verluste (Regendämpfung, Schneedämpfung, Nebel- bzw. Wolkendämpfung und Szintillationsverluste) sowie die geometrischen Verluste berechnet. Wahlweise kann das für einen Ort passieren, aber auch für bis zu drei Orte gleichzeitig.

### Numerische Ausgabe

Die numerische Ausgabe besteht bei dieser Simulation aus zwei Teilen. Die detaillierte Übersicht über die einzelnen (Wolken-)Schichten (siehe Abbildung 4.2) und die eigentlichen Ergebnisse der Berechnung (siehe Abbildung 4.3). Die verwendeten Einstellungen für das angeführte Beispiel sind in Tabelle 4.1 angeführt.

<b>Time &amp; Location</b>			
<i>Year:</i>	1983	<i>Location1:</i>	Graz
<i>Month:</i>	February	<i>Location2:</i>	Milano
<i>Day:</i>	9	<i>Location3:</i>	Prague
<i>Hour:</i>	18		
<b>Transmitter</b>			
<i>Lensdiameter:</i>	10 [mm]	<i>Field of View:</i>	0.2 [mrad]
<i>Wavelength:</i>	1550 [nm]	<i>Elevation:</i>	70 [°]
<b>Receiver</b>			
<i>Lensdiameter:</i>	1000 [mm]		
<b>Channel</b>			
<i>Channel length:</i>	36000 [km]	<i>Troposphere height:</i>	12 [km]
<b>Fog Attenuation</b>			
<i>Model:</i>	Kim	<i>Transm. of Air Drops:</i>	5 [%]
<i>ToAD at wavelength:</i>	550 [nm]		
<b>Rain</b>			
<i>Rain rate:</i>	Average Case		
<b>Scintillation Att.</b>			
<i>Turbulence:</i>	$3 \cdot 10^{-16} [m^{-\frac{2}{3}}]$	<i>Fluctuation:</i>	weak

Tabelle 4.1: Einstellungen für die Simulations-Beispiele

In der detaillierten Ansicht sieht man zuerst eine Reihe von Schichten (Layer). Jeder Layer repräsentiert eine horizontale Schicht innerhalb der Atmosphäre. Die Dicke dieser Schicht steht gleich daneben und wird vom ERA-15 Parameter `h_prof` vorgegeben. Da die Größen der Schichten je nach Ort und Zeitpunkt unterschiedlich sind, ändern sich auch die Anzahl der Layer. Abbildung 4.2 zeigt nur einen Teil der Ausgabe, da der gesamte zu lange wäre. Simuliert man das Beispiel ist aber zu sehen, dass die Anzahl der Layer für Graz 44, für Mailand 42 und für Prag 47 ist. Neben der Dicke der Schicht ist die Visibility angegeben. In den meisten Fällen steht dort 99 km. Das bedeutet, dass diese Schicht keine Wolken beinhaltet und die Sicht uneingeschränkt ist. Sinkt die Sichtweite unter 99 km heißt das, dass eine Wolkenschicht vorhanden ist. In der letzten Spalte wird auch noch die Dämpfung der einzelnen Schichten angegeben. Diese Ausgabe wird für jeden eingestellten Ort dargestellt. Da diese detaillierte Ausgabe aber nicht immer erwünscht ist, kann man sie auf der grafischen Benutzeroberfläche mit der Funktion „Show details“ unterdrücken.

[Graz]			
Layer	Thickness [km]	visibility [km]	Attenuation [dB]
Layer1	0.032	99.000	0.00080
Layer2	0.037	99.000	0.00094
Layer3	0.038	99.000	0.00094
Layer4	0.038	99.000	0.00095
Layer5	0.040	99.000	0.00101
Layer6	0.040	99.000	0.00101
Layer7	0.041	99.000	0.00102
Layer8	0.041	99.000	0.00102
Layer9	0.041	99.000	0.00103
Layer10	0.060	99.000	0.00150
Layer11	0.031	99.000	0.00078
Layer12	0.092	34.276	0.00912
Layer13	0.093	5.323	0.06641
Layer14	0.111	2.445	0.27655
Layer15	0.112	1.415	0.57403
Layer16	0.114	0.990	0.89993
Layer17	0.127	0.757	1.66887
Layer18	0.129	0.600	2.50957
Layer19	0.131	0.501	3.38470
Layer20	0.210	0.433	6.32758
Layer21	0.208	0.357	7.58687
Layer22	0.008	0.318	0.31676
Layer23	0.227	99.000	0.00568
Layer24	0.233	99.000	0.00584
Layer25	0.241	99.000	0.00603
Layer26	0.248	99.000	0.00621
Layer27	0.252	99.000	0.00632
Layer28	0.261	99.000	0.00653
Layer29	0.262	99.000	0.00657
Layer30	0.271	99.000	0.00680
Layer31	0.272	99.000	0.00680
Layer32	0.282	99.000	0.00705
Layer33	0.573	99.000	0.01435
Layer34	0.593	99.000	0.01486
Layer35	0.615	99.000	0.01539
Layer36	0.636	99.000	0.01593
Layer37	0.658	99.000	0.01647
Layer38	0.681	99.000	0.01705
Layer39	0.708	99.000	0.01774
Layer40	0.742	99.000	0.01857
Layer41	0.784	99.000	0.01963
Layer42	0.836	99.000	0.02093
Layer43	0.896	99.000	0.02243
Layer44	0.966	99.000	0.02418

Abbildung 4.2: Detaillierte Numerische Ausgabe der Funktion Simulation (details)



Die Ausgabe in Abbildung 4.3 kann nicht ausgeblendet werden. Sie enthält die wesentlichen Ergebnisse der Simulation. Untereinander sind dort die Dämpfungen einzeln aufgelistet, sowie auch das Gesamtergebnis.

ATMOSPHERIC EFFECTS	Graz	Milano	Prague
Rain:	0.00000 dB	0.00000 dB	0.00000 dB
wet Snow:	0.00000 dB	0.00000 dB	0.00000 dB
Dry Snow:	0.00000 dB	0.00000 dB	9.36096 dB
Clouds:	23.91275 dB	0.32682 dB	10.93388 dB
Geometric:	77.68694 dB	77.68694 dB	77.68694 dB
Scintillation:	1.51530 dB	1.51503 dB	1.55437 dB
<b>Total:</b>	<b>103.11499 dB</b>	<b>79.52879 dB</b>	<b>99.53616 dB</b>

Abbildung 4.3: Numerische Ausgabe der Funktion Simulation (details)

### Grafische Ausgabe

Die grafische Ausgabe dieser Simulation besteht aus zwei bzw. drei Grafiken (siehe Abb. 4.4). Die erste Grafik beschäftigt sich mit der Dämpfung die durch Nebel und Wolken verursacht wird. Steigt die Kurve steil an, wie in diesem Beispiel bei Mailand, so gibt es kaum Dämpfungen und damit klare Sicht über die gesamte Strecke. Ist die Kurve sehr flach, wie bei Prag und hier vor allem wie im Fall von Graz, so bedeutet das ein Vorhandensein von Wolkenschichten und somit eine Dämpfung des Übertragungssignals. Die zweite Grafik zeigt die gesamte Dämpfung die innerhalb der Atmosphäre auftritt. Man kann sehen, dass sich zu Beginn vor allem die Wolkendämpfung auswirkt und erst ab einer Höhe von 5 km die geometrischen Verluste zu wirken beginnen. Das liegt daran, dass die Linsen dementsprechend dimensioniert wurden, dass sie bis zu diesem Punkt noch das gesamte Signal empfangen würden. Erst danach beginnt sich die Geometrie auszuwirken. Die dritte Grafik erscheint nur, wenn die Übertragungsstrecke lang genug ist, um die Atmosphäre zu verlassen. Hier wirken sich nur noch die geometrischen Verluste aus.

#### 4.2.2 Funktion: Simulation (year)

Diese Simulation gibt die gesamten Übertragungsverluste für jeden vorhandenen Zeitpunkt des eingestellten Jahres wieder. Es wird dabei aber nicht mehr aufgeschlüsselt wodurch diese Verluste zustande gekommen sind. Auch hier ist es wieder möglich bis zu drei Orte einzustellen. Die Simulation dient vor allem zwei Zwecken. Einerseits soll man in der numerischen Ausgabe schnell erkennen zu welchen Zeitpunkten im Jahr interessante atmosphärische Bedingungen vorherrschten. Möchte man Übertragung bei starker Bewölkung oder Schnee simulieren, muss man nicht dutzende Zeitpunkte mit der Funktion „Simulation (details)“ ausprobieren und hoffen, dass ein solches Wetterereignis auftritt, sondern kann sich bewusst ein Datum aus der Liste aussuchen an dem starke Dämpfungen auftraten. Zum anderen kann man an Hand der grafischen Ausgabe erkennen, wie

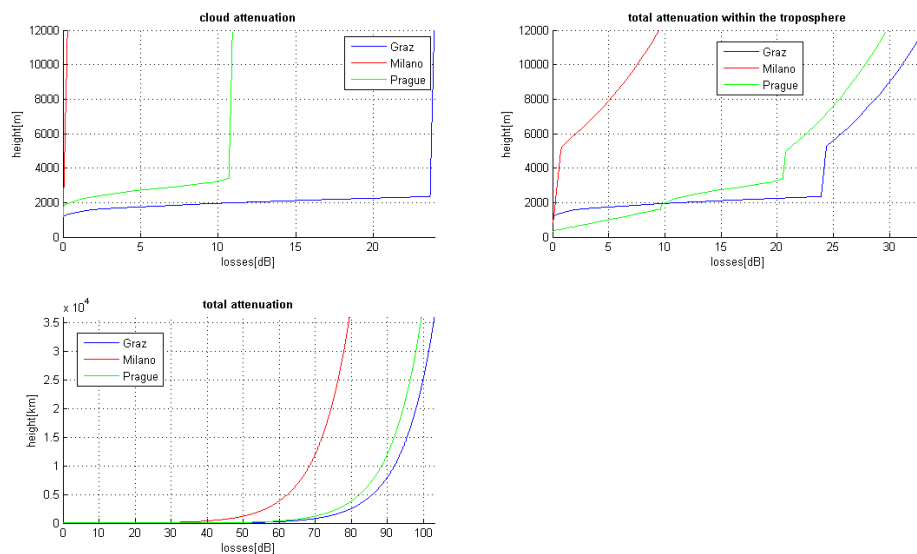


Abbildung 4.4: Grafische Ausgabe der Funktion Simulation (details)

sich die atmosphärischen Einflüsse im Verlauf des Jahres auf einen Ort auswirken. Macht man das mit mehreren Jahren können gewisse Trends erkannt werden, zu welchen Zeitpunkten im Jahr an einem gewissen Ort gute oder schlechte Übertragungsbedingungen herrschen. Zudem kann man Dämpfungen mehrerer Orte miteinander vergleichen.

### Numerische Ausgabe

In Abbildung 4.5 ist ein Beispiel für die Numerische Ausgabe dieser Simulation dargestellt. Die Einstellungen sind dieselben wie im Beispiel zuvor, nur dass diesmal die Felder Monat, Tag und Stunde nicht angegeben werden müssen. Auch ist hier entscheidend, welchen Ort man zuerst einstellt. Denn bei dieser Simulation werden auf Grund der Menge der Daten nur die Ergebnisse des ersten Orts numerisch ausgegeben. Ansonsten würde die Simulationszeit zu stark ansteigen, da die Ausgabe der Daten im Befehlsfenster sehr zeitintensiv ist. In Abbildung 4.5 ist nur ein kleiner Teil der Ausgabe zu sehen. Es werden für jeden Tag des eingestellten Jahres, für alle vier Zeitpunkte die gesamten Verluste des Übertragungssignals berechnet und dargestellt.

### Grafische Ausgabe

Die grafische Ausgabe besteht hier nur aus einer Grafik. Darin sind die gesamten Verluste aller drei Orte für jeden Zeitpunkt des Jahres abgebildet (siehe Abb. 4.6). Man kann se-

## 4.2 Die Simulation

-----  
 Total attenuation for the year 1983 in Graz  
 -----

Day	00:00	06:00	12:00	18:00
01.01	79.4905	79.4904	79.5319	79.5322
02.01	79.5322	79.5321	80.4996	108.9698
03.01	79.5507	79.5511	79.5335	129.0390
04.01	129.3357	79.5066	79.5678	79.5665
05.01	79.5662	79.5669	150.9110	231.6424
06.01	79.5803	79.5815	79.5832	79.5830
07.01	79.5816	79.5385	79.5580	79.5571
08.01	84.2784	110.3283	113.4761	86.9760
09.01	79.5764	79.5785	79.5797	79.5792
10.01	79.5774	79.5764	79.5767	79.5778
11.01	79.5787	79.5789	79.5809	79.5805
12.01	79.5806	79.5805	79.5814	79.5810
13.01	79.5806	79.5799	79.5803	79.5790
14.01	79.5776	81.2407	82.3160	80.5812
15.01	85.7273	79.5893	79.5897	79.5482
16.01	79.5919	91.9430	79.5922	79.5920
17.01	79.5512	79.5751	86.5894	79.5770
18.01	79.5777	79.5987	79.5982	79.5967
19.01	79.5952	79.5920	79.5902	79.5670
20.01	79.5658	79.5643	79.5647	79.5656
21.01	79.5665	79.5690	86.4383	79.5725
22.01	85.7436	79.5762	79.5772	79.5765
23.01	79.5759	79.5754	79.5765	79.5767
24.01	79.5771	79.5773	79.5776	79.5778
25.01	79.5785	79.5792	79.5808	79.5414
26.01	87.8312	176.9842	79.5390	162.0592
27.01	109.4434	83.9147	79.5790	91.5282
28.01	80.5309	79.5734	79.5747	79.5751
29.01	79.4799	79.9171	79.5144	79.5348
30.01	79.5343	79.6012	88.2764	79.5278
31.01	95.6517	79.5671	79.5687	79.5508
01.02	79.5746	192.7128	79.5743	79.5737
02.02	79.5716	79.5680	79.5665	79.5455
03.02	79.5445	79.5445	79.5447	79.5439
04.02	79.5452	79.5442	79.5439	79.5437
05.02	79.5445	79.5468	79.5484	79.5356
06.02	113.4111	192.8849	194.8211	204.6021
07.02	81.7883	79.5860	79.5862	79.5433
08.02	79.6671	106.1719	79.5881	84.8970
09.02	79.9832	106.9109	82.8780	103.1342
10.02	87.6608	79.5885	82.1503	162.6021
11.02	108.4178	79.5472	180.9963	187.0316
12.02	110.7690	79.5874	79.5879	79.5882
13.02	79.5888	79.5671	85.3707	79.6056
14.02	111.3202	194.3759	144.4775	114.5626

Abbildung 4.5: Numerische Ausgabe der Funktion Simulation (year)

hen, dass auf Grund der geometrischen Verluste eine gewisse Dämpfung immer vorhanden ist, selbst wenn keine störenden atmosphärischen Bedingungen vorhanden sind.

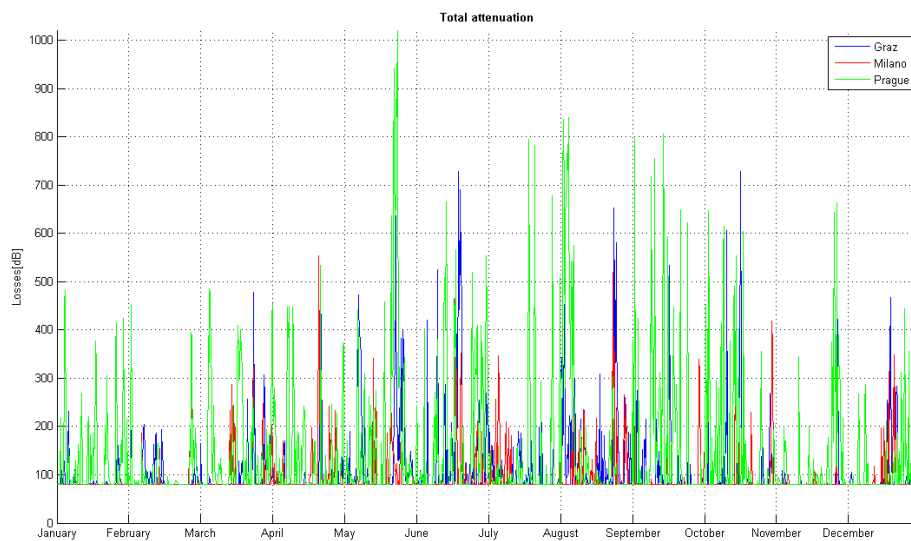


Abbildung 4.6: Grafische Ausgabe der Funktion Simulation (year)

### 4.2.3 Funktion: Weather statistics

Diese Simulation gibt nicht die gesamte Dämpfung, die entlang einer Übertragungsstrecke auftreten kann wider, sondern zeigt wie groß der Einfluss einzelner Wetterbedingungen auf die Übertragung ist. Hier ist es nicht möglich mehrere Standorte gleichzeitig zu wählen. Startet man die Simulation gibt es wieder eine numerische Ausgabe (siehe Abb. 4.7) und eine grafische Ausgabe mit vier Darstellungen (siehe Abb. 4.8).

#### Numerische Ausgabe

Die numerische Ausgabe zeigt für jeden Zeitpunkt des ausgewählten Jahres die Dämpfungen, die durch Regen, Schnee und Wolken (Nebel) verursacht werden. Außerdem wird ebenfalls die Temperatur angezeigt. Diese Ausgabe ist sinnvoll, wenn man genauere Informationen über den Einfluss einzelner Wetterbedingungen im Verlauf eines Jahres bekommen möchte.

```

-----
statistics for the year 1983 in Graz
-----

```

Data	Rain[dB]	snow[dB]	clouds [dB]	Temperature[°C]
01.01	0.00000	0.00000	0.28830	-7.73893
01.01	0.00000	0.00000	0.28814	-6.97050
01.01	0.00000	0.00000	0.32969	-4.03712
01.01	0.00000	0.00000	0.32998	-5.16434
02.01	0.00000	0.00000	0.32996	-6.78950
02.01	0.00000	0.00000	0.32986	-5.24067
02.01	0.00000	0.00000	1.29736	-1.74848
02.01	0.00000	0.00000	29.76755	-1.30378
03.01	0.00000	0.00000	0.34849	0.25652
03.01	0.00000	0.00000	0.34886	-1.06174
03.01	0.00000	0.00000	0.33122	-1.30872
03.01	0.00000	0.00000	49.83673	-0.91135
04.01	0.00000	0.00000	50.13349	0.53896
04.01	0.00000	0.00000	0.30433	1.68264
04.01	0.00000	0.00000	0.36556	4.05859
04.01	0.00000	0.00000	0.36422	5.27578
05.01	0.00000	0.00000	0.36391	4.77868
05.01	0.00000	0.00000	0.36464	4.74166
05.01	0.00000	0.00000	71.70876	3.75460
05.01	0.00000	0.00000	152.44020	1.72851
06.01	0.00000	0.00000	0.37809	2.31167
06.01	0.00000	0.00000	0.37926	3.00817
06.01	0.00000	0.00000	0.38091	3.31252
06.01	0.00000	0.00000	0.38072	2.98159
07.01	0.00000	0.00000	0.37940	0.66100
07.01	0.00000	0.00000	0.33630	-0.47089
07.01	0.00000	0.00000	0.35571	0.77886
07.01	0.00000	0.00000	0.35489	1.63503
08.01	0.00000	9.05777	5.07615	-0.56763
08.01	0.00000	0.00000	31.12603	-0.72999
08.01	0.00000	0.00000	34.27388	1.26702
08.01	0.00000	0.00000	7.77373	0.91042
09.01	0.00000	0.00000	0.37414	-2.68888
09.01	0.00000	0.00000	0.37628	-2.89680
09.01	0.00000	0.00000	0.37742	-2.90125
09.01	0.00000	0.00000	0.37695	-4.07908
10.01	0.00000	0.00000	0.37516	-5.29841
10.01	0.00000	0.00000	0.37411	-2.80118
10.01	0.00000	0.00000	0.37447	1.32034
10.01	0.00000	0.00000	0.37554	-1.26581
11.01	0.00000	0.00000	0.37641	-4.04941
11.01	0.00000	0.00000	0.37669	-4.18128
11.01	0.00000	0.00000	0.37865	-2.86747
11.01	0.00000	0.00000	0.37824	-3.11640
12.01	0.00000	0.00000	0.37840	-4.35450
12.01	0.00000	0.00000	0.37828	-4.24003
12.01	0.00000	0.00000	0.37917	-1.58896

Abbildung 4.7: Numerische Ausgabe der Funktion „Weather Statistics“

### Grafische Ausgabe

Die vier Darstellungen geben die Resultate grafisch wider und machen sie so anschaulicher. So kann man sehen, wie sich die Dämpfungen durch Regen, Schnee und Wolken über das Jahr Verteilen.

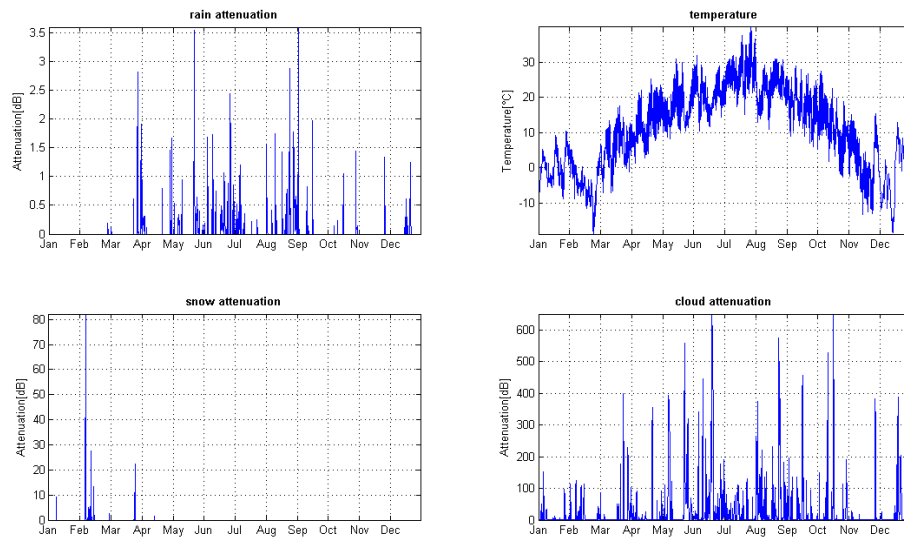


Abbildung 4.8: Grafische Ausgabe der Funktion „Weather Statistics“

## 5 Quellcode

In diesem Kapitel werden wichtige Teile des Quellcodes aufgelistet und näher darauf eingegangen. Es gibt innerhalb des Codes Kommentare, die es anderen Personen, die nicht mit dem Code vertraut sind, erleichtern sollen sich zu Recht zu finden. Trotzdem ist eine genauere Erklärung bei einem Programm dieses Umfangs (über 4000 Zeilen) dennoch von Vorteil.

Das Programm besteht aus vier MATLAB Dateien (GUI.m, Calculation.m, simulationYear.m und statistics.m) auf die auf den folgenden Seiten eingegangen wird.

### 5.1 GUI.m

Die Datei GUI.m ist die zentrale Datei des Programms. Sie wird benötigt um das Programm zu starten. Dies geschieht entweder durch den Befehl „run GUI“ oder indem man die Datei in das Befehlsfenster zieht. GUI.m ist auch dafür verantwortlich, dass die grafische Benutzeroberfläche geladen wird. Beinahe der gesamte Code in dieser Datei ist dafür zuständig. Außerdem liest sie die Werte des Benutzers ein, speichert sie ab und übergibt sie den Funktionen als Parameter, wenn diese aufgerufen werden.

Eine sehr nützliche Funktion ist die Möglichkeit eigene Standartwerte einzustellen. Dies vereinfacht die Handhabung der Benutzeroberfläche bei häufiger Verwendung gleicher Einstellungen. Um Standartwerte festzulegen muss man die Datei GUI.m öffnen und dort die gewünschten Werte eingeben. Wie das genau auszusehen hat wird im Folgenden erklärt. In Abbildung 5.1 ist der Codeausschnitt dargestellt (Zeilen 98 - 143). Um diese Einstellungen aufzurufen, muss man auf der Benutzeroberfläche nur den Knopf „Set Default“ drücken.

Die Codezeilen sind genauso in Gruppen angeordnet wie die dazugehörigen Einstellungen auf der Benutzeroberfläche. Soll nun ein Wert verändert werden, muss man nur die entsprechende Zeile auswählen und die Zahl am Ende der Zeile verändern. Welche Zeile für welchen Wert zuständig ist zeigen die Kommentare an. Bei den Einstellungen bei denen vor dem Wert der Ausdruck „String“ steht, gibt man den gewünschten Wert direkt ein. Im dazugehörigen Kommentar wird die entsprechende Einheit angegeben. Steht vor dem Wert ein „Value“ so gibt es zwei Möglichkeiten. Handelt es sich um ein Optionsfeld (Radio Button) bedeutet der Wert 1.0, dass die Auswahl markiert ist und der Wert 0.0, dass die Auswahl nicht markiert ist. Handelt es sich um ein pop-up Menü bedeutet das, dass man

```
%-----
%Set default parameters
%-----

%Time & Location
set(handles.popupYear,'Value',1); %Year
set(handles.popupMonth,'Value',12); %Month
set(handles.popupDay,'Value',1); %Day
set(handles.popupHour,'Value',1); %Hour
set(handles.popupLocation1,'Value',1); %Location1
set(handles.popupLocation2,'Value',1); %Location2
set(handles.popupLocation3,'Value',1); %Location3

%Transmitter
set(handles.editTXLens,'String',10); %Transmitter lensdiameter [mm]
set(handles.editFoV,'String',0.2); %Field of View [mrad]
set(handles.PopupMenu01,'Value',6); %Wavelength pop up menu
set(handles.editElevation,'String',70); %Elevation [°]

%Receiver
set(handles.editRXLens,'String',1000); %Receiver diameter [mm]

%Channel
set(handles.editChannel,'String',36000); %Channel length [km]
set(handles.editTrop,'String',12); %Troposphere height [km]

%Fog Attenuation
set(handles.editToAD,'String',5); %Transmission of Air Drops [%]
set(handles.editToADwave,'String',550); %ToAD of wavelength [nm]

%Scintillation Attenuation
set(handles.editTurb,'String',3e-16); %Turbulence [m^-2/3]

%Datapath
set(handles.editDatapath,'String','C:\ERA-15'); %Datapath

%Radio Buttons
set(handles.DetailsOnOff,'Value',1.0); %Details on (1.0) / off (0.0)
set(handles.FiguresOnOff,'Value',1.0); %Figures on (1.0) / off (0.0)
set(handles.KimOnOff,'Value',1.0); %Kim on (1.0) / off (0.0)
set(handles.KruseOnOff,'Value',0.0); %Kruse on (1.0) / off (0.0)
set(handles.AverageCaseOnOff,'Value',1.0); %Average Case on (1.0) / off (0.0)
set(handles.WorstCaseOnOff,'Value',0.0); %Worst Case on (1.0) / off (0.0)
set(handles.ScintillationOnOff,'Value',1.0); %Scintillation on (1.0) / off (0.0)
set(handles.WeakFluctuationOnOff,'Value',1.0); %Weak Fluctuation on (1.0) / off (0.0)
set(handles.StrongFluctuationOnOff,'Value',0.0); %Strong Fluctuation on (1.0) / off (0.0)
```

Abbildung 5.1: Codeausschnitt: Standartwerte festlegen



nur zwischen bereits eingetragenen Werten wählen kann. Der eingetragene Wert repräsentiert dabei die Position in der Liste. In Abb. 5.1 steht beim Monat der Wert 12. Dies bedeutet, dass derzeit Dezember voreingestellt ist. Welche Einstellung sich auf welcher Position befindet kann auf der Benutzeroberfläche nachgesehen werden. Zu beachten ist, dass bei Location 2 und Location 3 der Wert 1 für „None“ steht, während der Wert 1 bei Location 1 für „Graz“ steht, da diese nicht auf „None“ gesetzt werden kann.

## 5.2 calculation.m

Wird der Knopf „Simulation(details)“ gedrückt, wird innerhalb der Datei GUI.m die Funktion calculation aufgerufen und ihr die nötigen Parameter übergeben. Mit diesem Aufruf wechselt das Programm in die Datei calculation.m und durchläuft dort die Befehlskette. Die erste Aufgabe der Funktion ist es die Eingabewerte zu überprüfen, um zu gewährleisten, dass das Programm korrekt ausgeführt werden kann. Dabei wird kontrolliert ob alle Werte positiv sind bzw. sich innerhalb des erforderlichen Wertebereichs befinden. Sind alle Werte richtig eingegeben arbeitet das Programm weiter, ansonsten bekommt der Benutzer eine Fehlermeldung angezeigt.

Der nächste Schritt ist das Laden der ERA-15 Daten. Dazu müssen dem Programm zunächst die Werte für den ausgewählten Standort übergeben werden um auf den richtigen Ordner zugreifen und die darin vorhandenen Daten laden zu können.

In Abbildung 5.2 sieht man, das zunächst mittels des „switch“ Befehls der Name und der Längen- und Breitengrad mit den Werten des ausgewählte Standorts geladen wird. Der vom Benutzer eingegebene Datenpfad wird nun um den Namen des Standorts erweitert, was den Zugriff auf den gewünschten Unterordner ermöglicht. In Abbildung 5.3 ist der Zugriff auf den Parameter r\_6h dargestellt. Der Code ist beispielhaft für alle anderen ERA-15 Parameter, die ebenfalls zur Berechnung geladen werden müssen. Um den Code besser nachvollziehen zu können sollte man wissen wie die ERA-15 Ordner Hierarchie aussieht. Der Basisordner heißt „ERA-15“, darin befinden sich Ordner mit den Namen der Standorte. Jeder Standort hat weitere 15 Unterordner für die einzelnen Jahre. Diese Ordner sind nach dem Schema **Breitengrad\_Längengrad\_Jahr** aufgebaut, wobei der Breitengrad und der Längengrad drei Stellen einnehmen müssen und das Jahr zwei Stellen. 030\_011\_01 wäre also der Ordner für die Daten des Jahres 1978 aus Graz. Die darin enthaltenen Parameter sind nach einem ähnlichen Schema, nämlich **Parameter\_Breitengrad\_Längengrad\_Jahr**, aufgebaut. Außerdem gibt es für jeden Parameter zwei Dateien. Eine „dsc“ Datei, in dem nur der Name und die Einheit des Parameters angegeben ist und eine „dat“ Datei in der die eigentlichen Werte stehen. Auf diese Weise wird auf den gewünschten Parameter zugegriffen und dieser geladen.

Da die „dat“ Datei aber alle Werte für das gesamte Jahr enthält muss erst auf den richtigen Wert zugegriffen werden. Dabei gibt es drei unterschiedliche Fälle, denn je nachdem welches Jahr eingegeben wurde, beinhaltet die Datei unterschiedlich viele Werte. Die regulären Jahre haben 1460 Werte, die Schaltjahre 1464 und das erste Jahr nur

```
switch input_location1
  case 1; %Graz
    latitude = 30;
    longitude = 11;
    name = 'Graz';
    datapath1 = sprintf('%s\\%s',datapath, name);
  case 2; %Milano
    latitude = 31;
    longitude = 07;
    name = 'Milano';
    datapath1 = sprintf('%s\\%s',datapath, name);
  case 3; %Nice
    latitude = 32;
    longitude = 05;
    name = 'Nice';
    datapath1 = sprintf('%s\\%s',datapath, name);
  case 4; %Pisa
    latitude = 32;
    longitude = 08;
    name = 'Pisa';
    datapath1 = sprintf('%s\\%s',datapath, name);
  case 5; %Prague
    latitude = 27;
    longitude = 10;
    name = 'Prague';
    datapath1 = sprintf('%s\\%s',datapath, name);
end
```

Abbildung 5.2: Codeausschnitt: Auswahl des Standorts

```

%-----
%load surface parameter: r_6h ... Total rain (over 6 hours period) [m]
%-----

filename = sprintf('%s\\%03d_%03d_%02d\\%s_%03d_%03d_%02d.',datapath1,...
    latitude,longitude,input_year,surface_parameter_name_1,latitude,...
    longitude,input_year); %constructs the right path
fileext = 'dat'; %extention for a data file
file = [filename fileext];

fid = fopen(file,'r','b'); %opens the parameter
cmdline = sprintf('r_6h = fread(fid,inf,'float32');');
eval(cmdline);

```

Abbildung 5.3: Codeausschnitt: Laden des Parameters r\_6h

124, da mit der Aufzeichnung erst im Dezember begonnen wurde. Je nachdem welches Jahr ausgewählt wurde, wird mit den Eingabeparametern Monat, Tag und Stunde der gesuchte Index herausgefunden. Mit dem Index kann bei den Oberflächenparametern der exakte Wert gefunden werden, beziehungsweise bei den Profilparametern der gewünschte Vektor.

Der nächste Schritt ist es, den Liquid water profil Vektor auf korrekte Werte zu überprüfen. Dieser Vektor besteht, genauso wie die anderen Profilparameter, aus 80 Layer. Allerdings sind ab einen bestimmten Layer keine Werte mehr verfügbar, sondern mit dem Platzhalter NaN (Not a Number) versehen. Da das Programm bei der Berechnung damit nichts anfangen kann, muss der Vektor im Vorhinein bearbeitet werden. Matlab stellt hierfür die Funktion „isnan“ zur Verfügung, die 1 als Rückgabewert ausgibt, sobald ein NaN gefunden wurde. Der Vektor wird also solange durchlaufen bis eine 1 zurückgegeben wird. Die Anzahl der Schleifendurchläufe und somit die Anzahl der Werte wird mitgezählt und abgespeichert. Erleichtert wird das durch die Tatsache, dass nach dem ersten NaN keine echten Werte mehr folgen und deswegen die Schleife abgebrochen werden kann. Es werden danach zwei Vektoren erstellt. Der eine beinhaltet die gültigen LWC Werte, der andere die dazugehörigen Werte des Profilparameters „height profile“. Außerdem wird auch der Parameter r\_6h auf den Ausdruck NaN überprüft. Dies ist deshalb notwendig, da im ersten Jahr (1978) keine Daten für diesen Parameter verfügbar sind und das Programm deswegen Schwierigkeiten mit deren Verarbeitung hätte. Aus diesem Grund wird jedes NaN in eine Null umgewandelt. Dies ermöglicht dem Programm eine fehlerfreie Abarbeitung des Codes.

Im nächsten Bereich (siehe Abb. 5.4) findet die Unterscheidung zwischen Regen, nassen und trockenen Schnee statt. Wie diese Unterscheidung in der Theorie funktioniert wurde im Kapitel 3.1.2 bereits beschrieben. Es wird überprüft ob eines dieser Wetterereignisse stattfand. Dann wird mit den, in Tabelle 3.1 aufgelisteten Unterscheidungskriterien und dem Parameter sn überprüft, ob es sich um Regen, nassen oder trockenen Schnee handelt.

```
%r_6h covers a period of 6 hours and is given in meter. For calculation we
%need mm/h. There is no possibility to know if it was raining all 6 hours
%constant (average case) or if there was heavy rain for a short period
%(worst case).
if exact_surface_parameter_1 > 0
    %rain rate is defined as the amount of rain that fell down within 10
    %min. That amount of rain is than extrapolate to an hour. The average
    %case assumes that in every hour the same amount of rain fell down. The
    %worst case assumes that the whole amount of rain fall down in one
    %hour.
    if average_case_on_off == 1.0
        rain_rate = (exact_surface_parameter_1 * 1000) / 6; %convert in mm -> Average Case
    else
        rain_rate = (exact_surface_parameter_1 * 1000); %convert in mm -> Worst Case
    end
else
    rain_rate = 0;
end

rain_occured = 0;
wet_snow_occured = 0;
dry_snow_occured = 0;
cloud_height = ground_height;

%rain can only occure if the rain paramter(r_6h) is above 0 and rliq is also above 0
if sn_in_mm == 0 && exact_surface_parameter_1 ~=0 && exact_surface_parameter_4 ~=0
    rain_occured = 1;
    cloud_height = height_vector(1);
elseif sn_in_mm > 0 && exact_surface_parameter_4 ~=0 && exact_surface_parameter_4 <= 0.3...
    && temperature <= 0
    dry_snow_occured = 1;
    cloud_height = height_vector(1);
elseif sn_in_mm > 0 && exact_surface_parameter_4 ~=0
    wet_snow_occured = 1;
    cloud_height = height_vector(1);
end
```

Abbildung 5.4: Codeausschnitt: Unterscheidung zwischen Schnee und Regen

Es kann nur eines dieser Ereignisse vorkommen. Zwei oder mehrere dieser Art sind auf Grund der Entscheidungskriterien nicht möglich.

Die Berechnung der auftretenden Dämpfung, die durch Regen verursacht wird, ist relativ unspektakulär und besteht im Wesentlichen nur aus zwei Zeilen, in denen die Formel 3.11 im Programm umgesetzt wird.

Regen:

$$a_{rain} = 1.076 * rain\_rate^{(2/3)};$$
$$a_{rain\_in\_dB} = a_{rain} * cloud\_distance\_with\_elevation;$$

In der ersten Zeile wird die Dämpfung in dB/km errechnet. In der zweiten Zeile wird dieser Wert mit der Entfernung zur Regenwolke multipliziert, um die eigentliche Dämpfung zu erhalten. Die Höhe der Wolke wurde zuvor mit Hilfe der beiden Profilparameter errechnet. Im Vektor, der die LWC Werte beinhaltet (`LWC_vector`), wird nachgesehen an welcher Stelle der erste Wert ungleich Null vorkommt. Dann wird im Vektor, der die dazugehörigen Höhenwerte speichert (`height_vector`), die Höhe ermittelt in der dieser LWC Wert gemessen wurde. Von dieser Höhe wird die Höhe auf der sich die Bodenstation befindet (= der erste Wert vom Parameter `height_vector`) abgezogen und somit die Entfernung der Wolke zum Boden errechnet.

Die Berechnung der durch nassen und trockenen Schnee verursachten Dämpfung funktioniert gleich wie zuvor beim Regen. In der ersten Zeile wird die Dämpfung in dB/km berechnet und danach dieser Wert mit der Entfernung der Wolke multipliziert.

Nasser Schnee:

$$a_{wet\_snow} = (1.023e - 4 * transmitter\_wavelength * 1e9 + 3.7855466) * (sn\_in\_mm^{0.72});$$
$$a_{wet\_snow\_in\_dB} = a_{wet\_snow} * cloud\_distance\_with\_elevation;$$

Trockener Schnee:

$$a_{dry\_snow} = (5.42e - 5 * transmitter\_wavelength * 1e9 + 5.4958776) * (sn\_in\_mm^{1.38});$$
$$a_{dry\_snow\_in\_dB} = a_{dry\_snow} * cloud\_distance\_with\_elevation;$$

Die jeweiligen Berechnungen erfolgen natürlich nur, wenn im vorherigen Abschnitt (siehe Abb. 5.4) entschieden wurde, dass Regen oder Schnee auf der Übertragungsstrecke vorkommt. Die Dämpfung der nicht auftretenden Wetterereignisse werden automatisch auf Null gesetzt.

Der nächste Schritt ist die Berechnung der Dämpfung durch Nebel und Wolken. Das Programm unterscheidet dabei nicht zwischen diesen beiden Möglichkeiten, sondern behandelt sie auf die gleiche Weise. Zu beachten ist bei der Berechnung, dass sich eine Wolke nicht über die gesamte Höhe gleich verhält. Sie besteht aus unterschiedlichen Schichten, in denen sich der Flüssigkeitsgehalt verändert und somit auch die Sichtweite. Um die Dämpfung möglichst genau zu errechnen werden wieder die beiden Profilparameter benötigt. Zuerst wird immer der nächst höhere Wert des `height_vector` mit dem

```
%calculates the distance between every LWC value
dist_counter = 2;
while (dist_counter <= counter_end) || ...
    (exact_profile_parameter_1(dist_counter) <= troposphere_height_in_m)
    dist1 = exact_profile_parameter_1(dist_counter);
    dist2 = exact_profile_parameter_1(dist_counter - 1);
    dist_vector(dist_counter - 1) = dist1 - dist2;
    layer_number = layer_number + 1; %counts the number of values of the vector
    dist_counter = dist_counter + 1;
end

dist_vector_with_elevation = dist_vector ./ sin (elevation);

%visibility calculation by Gultepe. Also see 'Visibility parameterization
%from microphysical observation for warm fog condition and its application
%to the Canadian MC2 model'
for vis_counter = 1:layer_number
    LWC = exact_profile_parameter_2(vis_counter);
    if LWC ~= 0
        vis_obs_vector(vis_counter) = (0.0219 * LWC^-0.9603);
    else
        %if LWC is 0 then there is clear sky
        vis_obs_vector(vis_counter) = 99;
    end
end
end
```

Abbildung 5.5: Codeausschnitt: Berechnung der Visibility

vorhergegangenen subtrahiert, um die Distanzen zwischen den Werten zu erhalten. Bei diesen Distanzen wird auch die Elevation berücksichtigt um die wahre Länge der Übertragungsstrecke durch eine Schicht zu bekommen. Als nächstes wird die Visibility für jede Schicht berechnet. Es ist dabei vom LWC Wert abhängig ob eine Berechnung stattfindet oder nicht. Ist der Wert ungleich Null bedeutet dass ein Vorhandensein von Nebel oder einer Wolke. Solange auch der darauf folgende Wert ungleich Null ist, befindet man sich immer noch in derselben Wolke. Sollte der Wert gleich Null sein so befinden sich weder Wolken noch Nebel auf der Übertragungsstrecke. Die Visibility wird in diesem Fall symbolisch mit 99 km angenommen. Der dazugehörige Code ist in Abbildung 5.5 zu sehen.

Als nächstes wird mittels der Sichtweite die Dämpfung berechnet. Es wird dabei zwischen dem Kim und dem Kruse Modell unterschieden. Je nachdem was der Benutzer auf der Benutzeroberfläche ausgewählt hat, wird eine der Berechnungen abgearbeitet. Der Ablauf selbst ist in beiden Fällen gleich, nur die Methode den Faktor q auszuwählen ist bei den Modellen unterschiedlich (siehe Kapitel 3.2.2). In Abbildung 5.6 ist ein Codeausschnitt für die Berechnung mit dem Kim Modell zu sehen. Zuerst wird auf Grund der Visibility die Größe des Faktors q ermittelt. Dieser wird dann in die Formel 3.8 eingesetzt und die Dämpfung in dB/km für diese Schicht errechnet. Um nun wieder die Dämpfung in dB zu erhalten wird das Ergebnis mit der zuvor ermittelten Distanz zur nächsten Schicht multipliziert. Sofern die Option „Show details“ auf der Benutzeroberfläche aktiviert ist, werden Visibility, Dicke der Schicht und die Dämpfung im Befehlsfenster angezeigt. Der gleiche Ablauf findet auch für die nächsten Schichten statt, solange bis die Übertragungsstrecke die Atmosphäre verlässt.

Als nächstes wird die Dämpfung durch Szintillation berechnet. Hier wird im Wesentlichen nur überprüft ob die Formel 3.15 oder 3.16 verwendet werden soll.

Weak Fluctuation:

$$a\_scint = 2 * sqrt(1.23 * (2 * pi / (transmitter\_wavelength * 1e9) * 10^9)^{(7/6)} * actual\_turbulence * calculation\_length^{(11/6)});$$

Strong Fluctuation:

$$a\_scint = 2 * sqrt(23.17 * (2 * pi / (transmitter\_wavelength * 1e9) * 10^9)^{(7/6)} * actual\_turbulence * calculation\_length^{(11/6)});$$

Zuletzt werden noch die geometrischen Verluste nach Formel 3.7 berechnet.

$$a\_geo = 20 * log_{10}(((d1/1000) + D * channel\_length\_with\_elevation\_in\_km) / (d2/1000));$$

Nachdem dann alle Dämpfungen zusammengerechnet wurden wird das Ergebnis im Befehlsfenster ausgegeben.

Sobald die numerische Ausgabe erledigt ist, kümmert sich das Programm um die Erstellung der Grafiken. Dabei benötigen diese mehr Rechenaufwand als die eigentliche

```

if(kim_on_off == 1.0)
    count=1;
    if (details_on_off == 1.0)
        fprintf('\n\n                [%s]\n', name)
        fprintf('\nLayer      Thickness[km]      Visibility[km]      Attenuation[dB]\n')
        fprintf('-----\n')
    end
    while count <= layer_number && total_thickness <= troposphere_with_elevation_in_km
        actual_visibility = vis_obs_vector(count);
        if(actual_visibility > 50 && actual_visibility < inf) %decides which q will be used
            q = 1.6;
        elseif(actual_visibility <= 50 && actual_visibility > 6)
            q = 1.3;
        elseif(actual_visibility <= 6 && actual_visibility > 1)
            q = 0.16*actual_visibility + 0.34;
        elseif(actual_visibility <= 1 && actual_visibility > 0.5)
            q = actual_visibility - 0.5;
        else
            q = 0;
        end
        a_cloud_obs = (-1)*10*log10(trans_air_drops)/(actual_visibility) * ...
            (transmitter_wavelength*tad_at_wavelength)^(-q); %calculates fog / cloud attenuation
        a_cloud_layer_obs(count) = a_cloud_obs * dist_vector_with_elevation(count);...
            %converts the result from dB/km to dB
        if (details_on_off == 1.0)
            fprintf('Layer%d\t\t %0.3f\t\t\t\t %0.3f\t\t\t\t %0.5f\n', count,...
                dist_vector_with_elevation(count), actual_visibility, a_cloud_layer_obs(count))
        end
        total_thickness = total_thickness + dist_vector_with_elevation(count);
        count = count + 1;
    end
    a_cloud_total_obs = sum(a_cloud_layer_obs);

```

Abbildung 5.6: Codeausschnitt: Implementierung des Kim Modells



Berechnung des Ergebnisses. Der Grund dafür ist, dass für das numerische Resultat nur die Berechnung der Dämpfungen für eine bestimmte Distanz notwendig ist, während für die Grafiken viele Zwischenergebnisse wichtig sind um möglichst aussagekräftige Kurven zu erhalten.

Die erste Grafik benötigt am wenigsten Aufwand. Hier wird die Dämpfung durch den Einfluss von Wolken dargestellt, indem die Dämpfungen der einzelnen Schichten nacheinander hinzugefügt werden. Die Anzahl und die Dicke der Schichten wird von den beiden Profilparametern `h_prof` und `lw_prof` bestimmt.

Auch die zweite Grafik orientiert sich an diesen Parametern. Dabei ist der Rechenaufwand aber schon um einiges höher, da die Dämpfungen für Regen, Schnee, Szintillation und Geometrie für jede Schicht berechnet werden müssen. Die Dämpfung für Nebel und Wolken wird aus der vorhergegangenen Grafik entnommen.

Die Ausgangssituation der dritten Grafik ist wieder eine andere. Sie wird nur angezeigt, wenn die Übertragungstrecke die Atmosphäre verlässt. Auf Grund der großen Distanz die das Signal zurücklegen muss wird die Dämpfung nur alle 25 Kilometer neu berechnet. Im Falle eines geostationären Satelliten wären das aber trotzdem über 1400 Zwischenergebnisse. Diese vielen Kurvenpunkte stellen sicher, dass eine aussagekräftige Kurve abgebildet wird. Da außerhalb der Atmosphäre nur noch die geometrischen Verluste relevant sind, vereinfacht sich die Rechnung etwas und der Aufwand für das Programm ist dementsprechend geringer.

## 5.3 simulationYear.m

Die Funktion `Simulation (Year)` ist vom Aufbau her sehr ähnlich. Zuerst werden die Sicherheitsabfragen durchlaufen um einen reibungslosen Ablauf des Programms zu gewährleisten. Dann werden die ERA-15 Daten aus der Datenbank geladen. Dies passiert auf dieselbe Weise wie zuvor. Einziger Unterschied ist diesmal, dass nicht die Daten eines bestimmten Zeitpunktes, sondern des gesamten Jahres geladen werden. Danach wird wieder der `lw_prof` Parameter überprüft und alle NaN Ausdrücke heraus gefiltert. Diesmal geschieht das aber nicht nur einmal, sondern eben für das gesamte Jahr (wie auch alle anderen Berechnungen innerhalb dieser Funktion), was den Rechenaufwand deutlich erhöht. Die eigentliche Berechnung der Dämpfungen ist identisch mit der aus der Datei `calculation.m`. Die Ausgabe der Ergebnisse im Befehlsfenster kann auf Grund der vielen Daten eine gewisse Zeit dauern, weswegen die Option „Show details“ hier recht nützlich sein kann. Die Grafik zeigt die gesamte Dämpfung des Übertragungssignals für jeden verfügbaren Zeitpunkt des ausgewählten Jahres an. Daran kann man erkennen, wie sich die Dämpfungen im Verlauf des Jahres verändern, wann extreme Werte auftreten, oder wie sich die Dämpfungen an diesem Standort im Vergleich zu anderen Standorten verhalten.

## 5.4 statistics.m

Der Code für diese Funktion ist im Vergleich zu den beiden anderen Funktionen relativ kurz, da es hier nicht möglich ist mehrere Standorte auszuwählen. Sie ist dazu da um einen genaueren Einblick in die Wetterverhältnisse eines Standorts und den daraus resultierenden Dämpfungen zu bekommen. Der Code ist im wesentlichen dem Code der beiden anderen Funktionen sehr ähnlich. Es werden wieder die Daten für das gesamte Jahr geladen und damit die Dämpfungen für Regen, Schnee und Wolken errechnet. Auf die Berechnung der Dämpfung durch Szintillation und der geometrischen Verluste wurde ganz verzichtet, da die Funktion keine Gesamtverluste wider gibt. Die Ausgabe besteht aus einer Auflistung der Dämpfungen für Regen, Schnee und Wolken, sowie der Temperatur für jeden vorhandenen Zeitpunkt. Dies wird sowohl als numerische Ausgabe im Befehlsfenster, als auch als Grafik bereit gestellt.

## 6 Darstellung von Berechnungsbeispielen

In diesem Kapitel werden drei unterschiedliche Situationen simuliert. Zum Einen wird ein Regenereignis dargestellt (siehe 6.1), zum anderen wird ein Zeitpunkt simuliert, zu dem sehr schlechte Sichtbedingungen vorgeherrscht haben (siehe 6.2). Außerdem wird zuletzt noch ein Nebelereignis gezeigt. Im Vergleich wird deutlich wie gering sich die Dämpfung durch Regen zu den Verlusten auf Grund von Nebel und Wolken auswirken. Es ist allerdings zu sagen, dass das gewählte Wolkenbeispiel ein sehr extremes ist.

### 6.1 Berechnungsbeispiel Regen

Wie in vorhergegangenen Kapiteln bereits erwähnt, wirkt sich Regen im Bereich der optischen Übertragung nicht so stark auf die Gesamtdämpfung aus wie etwa trockener Schnee oder Nebel bzw. Wolken. Trotzdem soll hier ein solches Regenereignis simuliert werden, um die Möglichkeiten des Kanalmodells darzustellen. In Tabelle 6.1 sind die Einstellungen für dieses Beispiel angegeben. Als Datum wurde der 6. August 1985 gewählt und der Ort ist Graz.

ATMOSPHERIC EFFECTS	
	Graz
Rain:	28.71246 dB
Wet snow:	0.00000 dB
Dry snow:	0.00000 dB
Clouds:	39.43063 dB
Geometric:	77.68694 dB
Scintillation:	1.51530 dB
Total:	<u>147.34534 dB</u>

Abbildung 6.1: Die numerische Ausgabe für das Berechnungsbeispiel Regen

In der zweiten Darstellung der Abbildung 6.2 kann man den Einfluss des Regens gut erkennen. Man sieht, dass die Dämpfung von der Höhe der Messstation bis auf eine Höhe von circa 5 Kilometer kontinuierlich ansteigt. In dieser Höhe befindet sich die Wolkenschicht, die für den Regen verantwortlich ist. Ab dort endet der Regen, aber dafür nimmt auf Grund der Wolken die Sichtweite ab und das führt zu einer weiteren Dämpfung.

## 6.1 Berechnungsbeispiel Regen

<b>Time &amp; Location</b>			
<i>Year:</i>	1985	<i>Location1:</i>	Graz
<i>Month:</i>	August	<i>Location2:</i>	None
<i>Day:</i>	6	<i>Location3:</i>	None
<i>Hour:</i>	0		
<b>Transmitter</b>			
<i>Lensdiameter:</i>	10 [mm]	<i>Field of View:</i>	0.2 [mrad]
<i>Wavelength:</i>	1550 [nm]	<i>Elevation:</i>	70 [°]
<b>Receiver</b>			
<i>Lensdiameter:</i>	1000 [mm]		
<b>Channel</b>			
<i>Channel length:</i>	36000 [km]	<i>Troposphere height:</i>	12 [km]
<b>Fog Attenuation</b>			
<i>Model:</i>	Kim	<i>Transm. of Air Drops:</i>	5 [%]
<i>ToAD at wavelength:</i>	550 [nm]		
<b>Rain</b>			
<i>Rain rate:</i>	Worst Case		
<b>Scintillation Att.</b>			
<i>Turbulence:</i>	$3 \cdot 10^{-16} [m^{-3}]$	<i>Fluctuation:</i>	weak

Tabelle 6.1: Einstellungen für das Berechnungsbeispiel Regen

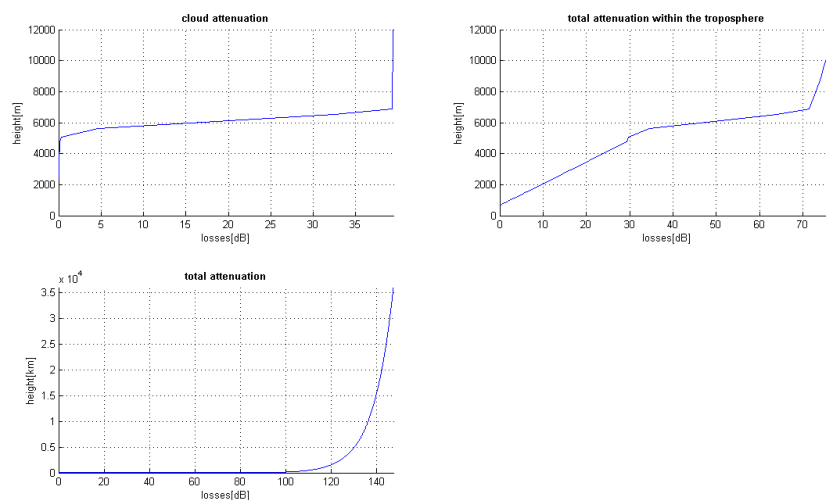


Abbildung 6.2: Die grafische Ausgabe für das Berechnungsbeispiel Regen

## 6.2 Berechnungsbeispiel Wolken

Für dieses Beispiel wurde der 27. August 1989 in Graz gewählt. Die restlichen Einstellungen sind in Tabelle 6.2 aufgelistet. Die Simulation ergibt eine sehr hohe Dämpfung auf Grund von Wolken. Dies liegt zum Einen daran, dass die Sichtweite bereits 35 Meter oberhalb der Messstation deutlich abnimmt und erst nach ungefähr 5 Kilometern wieder zunimmt, zum anderen aber auch an der Tatsache, dass über die gesamte Distanz eine sehr niedrige Sichtweite vorherrscht.

<b>Time &amp; Location</b>			
<i>Year:</i>	1989	<i>Location1:</i>	Graz
<i>Month:</i>	August	<i>Location2:</i>	None
<i>Day:</i>	27	<i>Location3:</i>	None
<i>Hour:</i>	0		
<b>Transmitter</b>			
<i>Lensdiameter:</i>	10 [mm]	<i>Field of View:</i>	0.2 [mrad]
<i>Wavelength:</i>	1550 [nm]	<i>Elevation:</i>	70 [°]
<b>Receiver</b>			
<i>Lensdiameter:</i>	1000 [mm]		
<b>Channel</b>			
<i>Channel length:</i>	36000 [km]	<i>Troposphere height:</i>	12 [km]
<b>Fog Attenuation</b>			
<i>Model:</i>	Kim	<i>Transm. of Air Drops:</i>	5 [%]
<i>ToAD at wavelength:</i>	550 [nm]		
<b>Rain</b>			
<i>Rain rate:</i>	Worst Case		
<b>Scintillation Att.</b>			
<i>Turbulence:</i>	$3 \cdot 10^{-16} [m^{-2/3}]$	<i>Fluctuation:</i>	weak

Tabelle 6.2: Einstellungen für das Berechnungsbeispiel Wolken

In Abbildung 6.3 sieht man die Wolken Schichten und die geringe Sichtweite innerhalb dieser Schichten. Die gesamte Dämpfung summiert sich dabei besonders deswegen so auf, da die Sichtweite über eine lange Strecke unter 100 Meter ist.

## 6.3 Berechnungsbeispiel Nebel

Für das dritte Beispiel wurde Prag als Standort ausgewählt. Die Daten stammen vom 23. November 1992. Die übrigen Einstellungen sind in Tabelle 6.2 aufgelistet.

Im Unterschied zum vorhergegangenen Beispiel kann man hier sehen, dass die Sichtweite nur in den unteren Schichten gering ist (siehe 6.6), während ab einer Höhe von ungefähr 2

### 6.3 Berechnungsbeispiel Nebel

[Graz]			
Layer	Thickness [km]	visibility[km]	Attenuation[dB]
Layer1	0.035	99.000	0.00087
Layer2	0.041	13.386	0.01025
Layer3	0.041	4.731	0.03595
Layer4	0.041	2.644	0.09131
Layer5	0.043	1.762	0.16733
Layer6	0.043	1.272	0.25266
Layer7	0.044	0.978	0.35323
Layer8	0.044	0.785	0.54042
Layer9	0.044	0.649	0.75547
Layer10	0.097	0.550	2.18609
Layer11	0.098	0.405	3.15544
Layer12	0.099	0.317	4.07474
Layer13	0.118	0.258	5.92318
Layer14	0.119	0.210	7.38267
Layer15	0.121	0.176	8.94358
Layer16	0.134	0.150	11.62890
Layer17	0.136	0.129	13.73653
Layer18	0.138	0.113	15.93032
Layer19	0.223	0.100	28.88964
Layer20	0.229	0.085	35.05485
Layer21	0.240	0.074	42.20803
Layer22	0.247	0.066	48.90605
Layer23	0.255	0.059	55.78802
Layer24	0.263	0.054	62.74337
Layer25	0.268	0.050	69.13669
Layer26	0.277	0.047	76.22787
Layer27	0.281	0.047	77.60126
Layer28	0.290	0.049	77.65318
Layer29	0.292	0.051	73.95681
Layer30	0.303	0.056	70.54202
Layer31	0.619	0.063	128.57895
Layer32	0.154	0.075	26.79271
Layer33	0.490	0.100	63.85358
Layer34	0.670	99.000	0.01678
Layer35	0.696	99.000	0.01743
Layer36	0.722	99.000	0.01807
Layer37	0.746	99.000	0.01869
Layer38	0.771	99.000	0.01931
Layer39	0.799	99.000	0.02000
Layer40	0.827	99.000	0.02070
Layer41	0.859	99.000	0.02152
Layer42	0.908	99.000	0.02275

Abbildung 6.3: Die numerische Ausgabe für das Berechnungsbeispiel Wolken

ATMOSPHERIC EFFECTS	
	Graz
-----	
Rain:	0.04545 dB
Wet Snow:	0.00000 dB
Dry Snow:	0.00000 dB
Clouds:	1013.27720 dB
Geometric:	77.68694 dB
Scintillation:	1.51530 dB
Total:	<u>1092.52489 dB</u>

Abbildung 6.4: Die numerische Ausgabe für das Berechnungsbeispiel Wolken

## 6.3 Berechnungsbeispiel Nebel

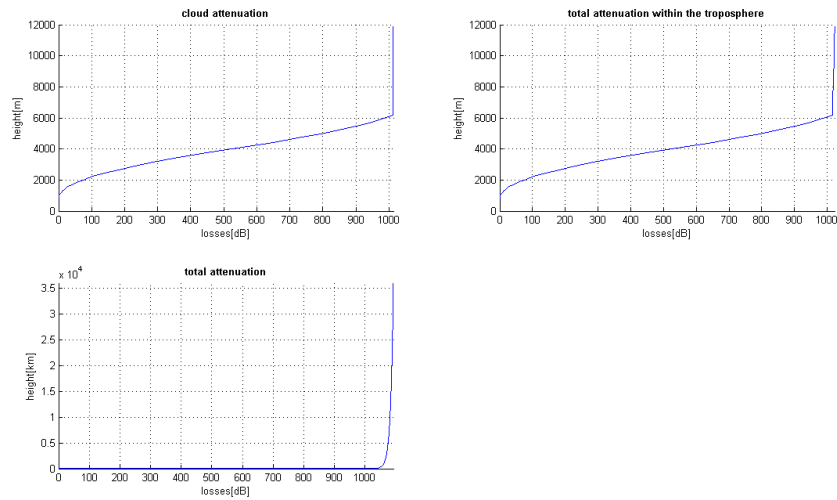


Abbildung 6.5: Die grafische Ausgabe für das Berechnungsbeispiel Wolken

<b>Time &amp; Location</b>			
<i>Year:</i>	1992	<i>Location1:</i>	Prague
<i>Month:</i>	November	<i>Location2:</i>	None
<i>Day:</i>	23	<i>Location3:</i>	None
<i>Hour:</i>	18		
<b>Transmitter</b>			
<i>Lensdiameter:</i>	10 [mm]	<i>Field of View:</i>	0.2 [mrad]
<i>Wavelength:</i>	1550 [nm]	<i>Elevation:</i>	70 [°]
<b>Receiver</b>			
<i>Lensdiameter:</i>	1000 [mm]		
<b>Channel</b>			
<i>Channel length:</i>	36000 [km]	<i>Troposphere height:</i>	12 [km]
<b>Fog Attenuation</b>			
<i>Model:</i>	Kim	<i>Transm. of Air Drops:</i>	5 [%]
<i>ToAD at wavelength:</i>	550 [nm]		
<b>Rain</b>			
<i>Rain rate:</i>	Worst Case		
<b>Scintillation Att.</b>			
<i>Turbulence:</i>	$3 \cdot 10^{-16} [m^{-2}]$	<i>Fluctuation:</i>	weak

Tabelle 6.3: Einstellungen für das Berechnungsbeispiel Nebel

### 6.3 Berechnungsbeispiel Nebel

---

Kilometern wieder wolkenloser Himmel ist. Dies deutet darauf hin, dass es sich um Nebel handelt. Da in diesem Programm Nebel und Wolken gleich behandelt werden, macht das in der Berechnung aber keinen Unterschied.

[Prague]			
Layer	Thickness [km]	visibility [km]	Attenuation [dB]
Layer1	0.034	99.000	0.00084
Layer2	0.039	17.522	0.00761
Layer3	0.040	6.160	0.02175
Layer4	0.040	3.415	0.06049
Layer5	0.042	2.258	0.11725
Layer6	0.042	1.621	0.18242
Layer7	0.042	1.243	0.25435
Layer8	0.043	0.996	0.33394
Layer9	0.043	0.822	0.48671
Layer10	0.071	0.694	1.08929
Layer11	0.072	0.550	1.61068
Layer12	0.072	0.454	2.07166
Layer13	0.073	0.384	2.46594
Layer14	0.115	0.332	4.50889
Layer15	0.117	0.269	5.65072
Layer16	0.118	0.222	6.93700
Layer17	0.133	0.187	9.21417
Layer18	0.135	0.158	11.06932
Layer19	0.137	0.136	13.08458
Layer20	0.147	0.118	16.20065
Layer21	0.150	0.104	18.78861
Layer22	0.153	0.092	21.48899
Layer23	0.065	0.083	10.14184
Layer24	0.176	0.080	28.71896
Layer25	0.248	99.000	0.00621
Layer26	0.257	99.000	0.00645
Layer27	0.265	99.000	0.00665
Layer28	0.272	99.000	0.00682
Layer29	0.281	99.000	0.00704
Layer30	0.285	99.000	0.00714
Layer31	0.295	99.000	0.00739
Layer32	0.606	99.000	0.01517
Layer33	0.631	99.000	0.01581
Layer34	0.659	99.000	0.01650
Layer35	0.686	99.000	0.01717
Layer36	0.712	99.000	0.01783
Layer37	0.739	99.000	0.01850
Layer38	0.766	99.000	0.01918
Layer39	0.793	99.000	0.01986
Layer40	0.818	99.000	0.02049
Layer41	0.842	99.000	0.02109
Layer42	0.873	99.000	0.02186
Layer43	0.919	99.000	0.02302

Abbildung 6.6: Die numerische Ausgabe für das Berechnungsbeispiel Nebel



### 6.3 Berechnungsbeispiel Nebel

---

ATMOSPHERIC EFFECTS	
-----	
	Prague
Rain:	0.00000 dB
Wet Snow:	0.00000 dB
Dry Snow:	0.00000 dB
Clouds:	154.78087 dB
Geometric:	77.68694 dB
Scintillation:	1.55437 dB
Total:	<u>234.02219 dB</u>

Abbildung 6.7: Die numerische Ausgabe für das Berechnungsbeispiel Nebel

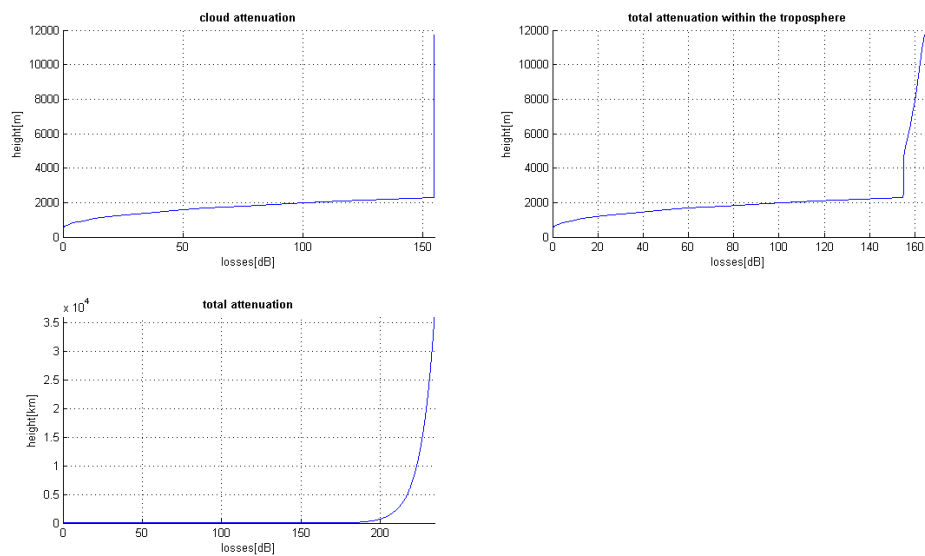


Abbildung 6.8: Die grafische Ausgabe für das Berechnungsbeispiel Nebel

## 7 Schlussfolgerung

In dieser Arbeit wurde ein Kanalmodell entworfen, das es ermöglicht optische Übertragungsstrecken und die Dämpfungen, die auf einer solchen Strecke vorkommen, möglichst realistisch zu simulieren. Durch das Verwenden der ERA-15 Datenbank und deren atmosphärische Parameter wurde sichergestellt, dass die verwendeten Werte nicht aus der Luft gegriffen, sondern tatsächlich für die jeweiligen Orte gültig sind. Durch die Verwendung dieser Parameter war es nötig Formeln und Umrechnungen zu finden, um diese in eine geeignete Form zu bringen, mit der man letztlich die Dämpfungen errechnen kann. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf Regen, Schnee, Wolken bzw. Nebel gelegt. Die größte Herausforderung dabei war das Finden einer Möglichkeit um aus den vorhandenen Parametern die Visibility zu bekommen. Leider fehlen in der Datenbank einige benötigte Parameter. Dies führt dazu, dass eine gewisse Ungenauigkeit in den Resultaten nicht verhindert werden kann.

Des Weiteren wurde das Programm möglichst benutzerfreundlich gestalten. Alle Daten die der Benutzer angeben muss können auf einer grafischen Benutzeroberfläche eingegeben werden. Diese wurde übersichtlich in Teilbereiche aufgeteilt. Das Programm verfügt über drei Funktionen, mit denen man nicht nur die Dämpfung für eine Übertragungsstrecke simulieren kann, sondern auch die Ergebnisse verschiedener Orte vergleichen und über längere Zeiträume verteilt betrachten kann. Außerdem sind neben den numerischen Ergebnissen auch grafische Darstellungen vorhanden.

Für die Zukunft wäre es sehr interessant das bestehende Programm online zu stellen und mit einer entsprechenden Datenbank, die sich in regelmäßigen Abständen aktualisiert, zu verknüpfen. So könnte man laufend aktuelle Resultate erhalten. Sollte diese Datenbank flächendeckende Messdaten enthalten, so wäre es möglich eine Art „Verfügbarkeitskarte“ zu erstellen, die zum Beispiel durch farbliche Kennzeichnung verdeutlichen würde, in welchen Gegenden gerade starke oder geringe Dämpfungen vorherrschen.

Eine weitere Idee wäre der Versuch Dämpfungen auf Übertragungsstrecken vorherzusagen. Auf Grund von Wettervorhersagen, dem Wissen, wie sich gewisse atmosphärische Bedingungen und Parameter zueinander verhalten und mit welcher Wahrscheinlichkeit sie es tun, könnte auch hier eine Karte erstellt werden, die die Größenordnung von Dämpfungen bereits im vornherein abschätzen könnte. Wie man an Hand von Wetterberichten sieht ist es nicht einfach genaue Vorhersagen zu treffen, aber mit den notwendigen Daten und den zuvor genannten Wissen könnte man eine grobe Abschätzung der Dämpfung vornehmen. Es wäre von Interesse im Voraus zu wissen wie sich die Dämpfung in einem Gebiet verhält.

# Literaturverzeichnis

- [1] E. LEITGEB, S. SHEIKH MUHAMMAD, C. CHLESTIL, M. GEBHART, G. KANDUS, and T. JAVORNIK, Importance of Reliable Optical Wireless Links in the Evolving Broadband Network, in *World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, 2005, Orlando, USA.
- [2] P. KÖHLDORFER, Implementierung eines Kanalmodells für 'Free Space Optical Links' mit MATLAB, 2005.
- [3] H. SANTNER, Bak.-Projekt Telematik, 2007.
- [4] B. HILLBRAND, Master Projekt Telematik, 2009.
- [5] E. LEITGEB, M. GEBHART, and P. FASSER, Nomadic Optical Wireless (Lichtfunk - Portable kabellose Netze im LAN-Bereich), in *International Conference and Workshop: Telecommunications and Mobile Computing*, 2001.
- [6] E. LEITGEB, J. BREGENZER, M. GEBHART, P. FASSER, and A. MERDONIG, *SPIE* **4975**, 57 (2003).
- [7] E. LEITGEB, M. GEBHART, U. BIRNBACHER, P. SCHROTTER, A. MERDONIG, and A. TRUPPE, *Beitrag und Präsentation zu SPIE's European Symposium on Optics and Photonics for Defence and Security* **5614**, 139 (2004).
- [8] P. FASSER and E. LEITGEB, Optische Nachrichtentechnik, Skriptum, TU Graz, 2007.
- [9] E. LEITGEB, M. GEBHART, P. FASSER, J. BREGENZER, and J. TANCZOS, Impact of atmospheric effects in free-space optics transmission systems, in *Beitrag zur Konferenz SPIE's Photonics West, Laser and Applications in Science and Engineering (LASE-2003) Symposium*, 2003, San Jose, USA.
- [10] M. GEBHART, *Lichtfunkgerät OptiKom PzP 300/10*, Institut für Breitbandkommunikation, 2002.
- [11] E. LEITGEB, M. GEBHART, U. BIRNBACHER, S. SHEIKH MUHAMMAD, and C. CHLESTIL, *OpNeTec* , 579 (2004).
- [12] T. TOLKER-NIELSEN and J.-C. GUILLEN, SILEX: The First European Optical Communication Terminal in Orbit, Bulletin 96, ESA, 1998.
- [13] J. HABY, Snow to Liquid Equivalent, <http://www.theweatherprediction.com/habyhints/346/>, last visited 25 Juli 2010.

- [14] R. RASMUSSEN, J. VIVEKANANDAN, and J. COLE, *Journal of Applied Meteorology* **38**, 1542 (1998).
- [15] S. MATROSOV, Modeling Backscatter Properties of Snowfall at Millimeter Wavelengths, 2006.
- [16] I. GULTEPE, J. MILBRANDT, and S. BELAIR, Visibility parameterization from microphysical observations for warm fog conditions and its application to the Canadian MC2 model, in *AMS Meeting*, 2006.
- [17] I. GULTEPE, M. D. MÜLLER, and Z. BOYBEYI, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **45**, 1469 (2006).
- [18] I. GULTEPE, S. G. COBER, G. A. ISAAC, D. HUDAK, P. KING, P. TAYLER, M. GORDON, P. RODRIGUEZ, B. HANSEN, and M. JAKOB, The Fog Remote Sensing and Modeling (FRAM) Field Project and Preliminary Results, in *Bull. Am. Meteor. Soc. accepted preproposal*, 2007.
- [19] Types of fog, National Oceanic and Atmospheric Administration, [http://www.crh.noaa.gov/jkl/?n=fog\\_types](http://www.crh.noaa.gov/jkl/?n=fog_types), last visited 29 September 2010.
- [20] M. LEHWALD, Wolkenklassifikation, <http://www.meteoworld.de/Wolkenatlas/index1.htm>, 2003, last visited 30 Juli 2010.
- [21] I. KIM, B. MCARTHUR, and E. KOREVAAR, *SPIE* **4214**, 26 (2001).
- [22] P. KRUSE, L. MCGLAUHLIN, and R. MCQUISTAN, *Elements of Infrared Technology: Generation, Transmission and Detection.*, New York: J. Wiley and Sons, 1962.
- [23] S. SHEIKH MUHAMMAD, P. KÖHLDORFER, and E. LEITGEB, Channel Modeling for Terrestrial Free Space Optical Links, in *ICTON*, 2005, Barcelona.