

# Bestimmung von Höhe und horizontaler Struktur leuchtender Nachtwolken (NLC) aus Kamerabildern durch Triangulation

Bachelor-Arbeit im Studiengang Physik angefertigt am Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik (IAP) Kühlungsborn, An-Institut der Universität Rostock

von Britta Schäfer, geb. am 26. Juli 1995 in Frankfurt am Main

1. Prüfer:Prof. Dr. F.-J. Lübken, IAP KühlungsbornBetreuer und 2. Prüfer:Dr. G. Baumgarten, IAP Kühlungsborn

Rostock, den 26. August 2016



ii

## Determination of height and horizontal structure of noctilucent clouds (NLC) from photographs by triangulation

Noctilucent clouds consist of ice particles and appear in the cold polar summer mesopause. This thesis deals with the analyzation of photographs of noctilucent clouds taken from Kühlungsborn and Warnemünde in 2015. It contains a review on historical methods as well as a set of about 500 triangulation height measurements covering different angles of observation from the mentioned images. The wellknown altitude of 83 km is confirmed and the accuracy of the height determination at different elevation angles is discussed. Additionally a projection of the cloud onto a map is used to determine the propagation velocity of special structures.

#### Bestimmung von Höhe und horizontaler Struktur leuchtender Nachtwolken (NLC) in Kamerabildern durch Triangulation

Leuchtende Nachtwolken bestehen aus Eisteilchen und treten in der kalten polaren Sommermesopause auf. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Auswertung von Fotos leuchtender Nachtwolken, die im Sommer 2015 von Kühlungsborn und Warnemünde aus aufgenommen wurden. Sie enthält ebenso einen Rückblick auf historische Methoden der Höhenbestimmung wie einen aktuellen Satz von ca. 500 per Triangulation bestimmten Höhen bei verschiedenen Beobachtungswinkeln. Die bereits sehr gut bekannte Höhe von 83 km kann bestätigt werden, des weiteren wird die Genauigkeit der Messung in Abhängigkeit des Elevationswinkels diskutiert. Außerdem wird eine Projektion der Wolke auf eine Landkarte genutzt, um die Ausbreitungsgeschwindigkeit bestimmter Strukturen zu bestimmen.

iv

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung				
	1.1. Die Erdatmosphäre	1			
	1.2. Leuchtende Nachtwolken	3			
2.	Bestimmung der Höhe von NLC				
	2.1. Historische Beobachtungen	7			
	2.2. Verwendete Koordinatensysteme	13			
	2.3. Bestimmung der Höhe aus den Kamerapositionen und Winkeln	14			
	2.4. Bestimmung der Beobachtungswinkel aus Kamerapositionen und be-				
	kannter NLC-Position	17			
	2.5. Bestimmung des Streuwinkels	18			
3.	NLC-Kameranetzwerk und Daten	21			
	3.1. NLC-Kamera-Netzwerk des IAP Kühlungsborn	21			
	3.2. Anzahl der NLC-Sichtungen, Auswahl der Daten	22			
4.	Auswertungsmethode	25			
	4.1. Verwendete Programmiersprache, Pakete	25			
	4.2. Ausrichtung und Blickfeld der Kamera	25			
	4.3. Betrachtung zweier Bilder, Projektion auf eine Landkarte	26			
5.	Auswertung der NLC vom 10./11.07.15	29			
	5.1. Ausrichtung und Blickfeld der Kamera, Aufnahmezeiten	29			
	5.2. Höhenbestimmung	33			
	5.2.1. Auswertung der ganzen Nacht ohne Beachtung besonderer Struk-				
	turen	33			
	5.2.2. Auswertung der Bewegung von Strukturen	36			
	5.3. Analyse von Wellenstrukturen in NLC-Aufnahmen	37			
6.	Zusammenfassung und Ausblick 4				

A.	Anhang					
	A.1.	Softwaremodule	43			
	A.2.	Erzeugung der Bildpaare	44			
	A.3.	Zu Kapitel 5.2.1: Histogramme	44			

## Kapitel 1.

## Einleitung

#### 1.1. Die Erdatmosphäre

Als Erdatmosphäre bezeichnet man die die Erde umgebenden Gasschichten. Sie besteht zu etwa 78% aus Stickstoff ( $N_2$ ), 21% aus Sauerstoff ( $O_2$ ) und 1% aus Argon (Ar). Dazu kommen Spurengase wie Kohlendioxid ( $CO_2$ , ca. 440 ppmv), Ozon ( $O_3$ ) und Wasserdampf ( $H_2O$ ). Bis zur Mesopause ändert sich die Zusammensetzung mit der Höhe wenig, wohl aber die Dichte, die gemäß der barometrischen Höhenformel 1.1 exponentiell abnimmt. Hier bezeichnet z die Höhe über der Erdoberfläche,  $z_0$  eine Referenzhöhe, in der der Druck p bekannt ist, m die mittlere Masse eines Luftteilchens, g die Erdbeschleunigung, k die Boltzmann-Konstante und T die mittlere Temperatur. Die Skalenhöhe H beträgt auf der Erde etwa 7–8 km.

$$p(z) = p(z_0)e^{-\frac{mg(z-z_0)}{kT}} = p(z_0)e^{-\frac{z-z_0}{H}}$$
(1.1)

Die Abgrenzung verschiedener Schichten der Atmosphäre erfolgt anhand ihrer Temperaturgradienten, sie besitzen abwechselnd einen negativen und positiven Gradienten. Typische Temperaturprofile, einmal im globalen Mittel und daneben speziell für polare Breiten, sind in Abb. 1.1 dargestellt.

Man erkennt, dass der kälteste Bereich der Atmosphäre die Mesopause ist, und zwar insbesondere im Sommer in hohen Breiten. Deshalb herrschen auch genau dort die passenden Bedingungen für die Bildung von Eisteilchen, die dann als leuchtende Nachtwolken sichtbar werden. Dass die Atmosphäre genau dort so kalt ist, liegt in der globalen Zirkulation begründet, die hier deshalb kurz dargestellt werden soll.



Abbildung 1.1.: Typischer Temperaturverlauf in der Atmosphäre mit Angabe der verschiedenen Schichten (links) (Rödel und Wagner 2011 [19]), Temperaturprofil der Erdatmosphäre in polaren Breiten (Lübken 2003 [13])

Der wesentliche Motor für die gesamte Dynamik der Atmosphäre ist der differentielle Strahlungsantrieb durch die Sonne. Am Äquator ist die pro Fläche eingestrahlte Leistung am größten und nimmt zu den Polen hin ab, sodass ein ausgleichender Energietransport nötig wird. Gemeinsam mit dem Wasser der Ozeane und deren großen Strömungen wie z.B. dem Golfstrom ist die Atmosphäre das Medium, das für den Energietransport vom Äquator hin zu den Polen sorgt, wobei sie den deutlich größeren Anteil hat. Auf der Erde führt das Zusammenspiel der Druckgradienten mit der durch die Erddrehung hervorgerufenen Corioliskraft zu einer aus drei Zellen bestehenden globalen Zirkulation, nämlich der Hadley-Zelle in den Tropen, der (instabilen) Ferrel-Zelle in den gemäßigten Breiten und der Polarzelle in den hohen Breiten. Über diese Zellen hinweg findet der Energietransport auf großen Skalen in Form von Gezeiten und planetaren Wellen statt, auf kleineren Skalen durch interne Schwerewellen. Die rücktreibende Kraft letzterer Wellen ist die Schwerkraft bzw. Auftriebskraft, daher sind sie empfindlich abhängig von Dichte- und Temperaturunterschieden. Ausgelöst in der Troposphäre breiten sich Schwerewellen vertikal bis in die Mesosphäre und untere Thermosphäre aus. Dort werden beim Übergang in Turbulenz Energie und Impuls freigesetzt, die dann für eine interhemisphärische Zirkulation vom Sommer- zum Winterpol sorgen. Gleichzeitig rufen aufwärts gerichtete vertikale Winde die tiefen Temperaturen im Sommer hervor (siehe Becker und Lübken 2015 [4]).

Eine in der mittleren Atmosphäre besonders wichtige Quelle für Turbulenz ist das Brechen von Schwerewellen (siehe auch Abb. 1.1). Wie letzteres Phänomen in leuchtenden Nachtwolken sichtbar wird, ist in Fritts et al. 1993 [8] beschrieben und wird in dieser Arbeit in Kapitel 5.3 betrachtet.



#### 1.2. Leuchtende Nachtwolken

Abbildung 1.2.: Leuchtende Nachtwolken am 10.07.2015 in Warnemünde

Leuchtende Nachtwolken (engl. noctilucent clouds, NLC) sind ein Phänomen, das im Sommer (auf der Nordhalbkugel von etwa Mitte Mai bis Mitte August) in den mittleren und höheren Breiten der Erde am Himmel beobachtet werden kann. Wie bereits erwähnt bestehen sie aus Eisteilchen in der Mesopausenregion, d.h. in etwa 83 km Höhe. Aufgrund des niedrigen Wasserdampfgehalts dieser Schicht sind Temperaturen zwischen etwa 120 K und 150 K (sowie eine ausreichende Anzahl an Kondensationskeimen) für die Bildung von NLC-Teilchen nötig. Genauere Untersuchungen zu Teilchengröße, -wachstum, und -dichte sind z. B. in Kiliani et al. 2013 [12] und in Zasetsky et al. 2009 [26] nachzulesen. Die maximal erreichten Teilchendurchmesser liegen demnach zwischen 20 und 70 nm. Die Teilchengrößen sind durch Streuquerschnitte (Annahme reiner Mie-Streuung) zugänglich und können einerseits vom Boden aus untersucht werden, andererseits auch satellitenbasiert. Erstere Methode arbeitet z.B. mit einem Mehrfarben-Lidar (siehe Baumgarten et al. 2008 [3]), ein Beispiel für letztere ist das CIPS-Instrument auf dem AIM-Satellit (CIPS: cloud imaging and particle size experiment, AIM: Aeronomy of Ice in the Mesosphere, siehe Russell et al. 2009 [20]). Bei der Beobachtung von Satelliten aus werden leuchtende Nachtwolken in der Regel als polare Mesosphärenwolken (PMCs) bezeichnet. Zur Höhenbestimmung von NLC eignen sich neben Kamerabildern auch Lidars sehr gut (siehe z.B. Fiedler et al. 2009 [7]). Diese ermöglichen jedoch im Gegensatz zu Kameras keine Beobachtung horizontaler Strukturen.

Durch die verglichen mit troposphärischen Wolken sehr große Höhe werden die Wolken nachts noch von der Sonne angestrahlt. Der mögliche Beobachtungszeitraum mit bloßem Auge sowie für Kameras ist die Zeit, in der die Sonne zwischen 6° und 16° unter dem Horizont steht (siehe Taylor et al. 1984 [23]). Die Beobachtungsgeometrie ist in Abb. 1.3 wiedergegeben.



Abbildung 1.3.: Geometrie zur Sichtbarkeit von NLC (nach Taylor et al. 1984 [23])

Die Beschäftigung mit leuchtenden Nachtwolken ist interessant nicht bloß ihrer Existenz wegen, sondern weil sie ausgeprägte Strukturen zeigen, deren Analyse Aufschluss über die Dynamik der Mesopause liefert, so z.B. über das Auftreten und Brechen von Schwerewellen. Alternativ können dazu auch Aufnahmen von Airglow ("Nachthimmelsleuchten") verwendet werden. Die wesentlichen Unterschiede zwischen beiden Erscheinungen sind die unterschiedliche optische Schichtdicke (NLC: ca. 1 km, Airglow: ca. 10 km) und die Lebensdauer. Bei leuchtenden Nachtwolken muss berück-

#### Einleitung

sichtigt werden, dass die Teilchen als Tracer fungieren, während Airglow in der Ionosphäre spontan abhängig von Teilchendichteschwankungen (z.B. OH<sup>-</sup>) entsteht und auch sofort wieder verschwindet. Sowohl für Anwendungen, bei denen Höhenbestimmungen anhand von Fotos gemacht werden sollen, als auch für solche, bei denen die Fotos auf eine Karte herunter projiziert werden sollen, ermöglicht die geringere vertikale Ausdehnung bei NLC eine höhere Genauigkeit.

Die Kenntnis der Höhe der leuchtenden Nachtwolken ist für Untersuchungen des Trends in der oberen Atmosphäre von besonderer Bedeutung, da die Höhe der Wolken hauptsächlich von der Temperatur in Höhe der Wolken abhängt. So führt ein Temperaturanstieg von 3 K zu einer ca. 1 km höheren NLC (siehe Fiedler et al. 2009 [7]). Wichtig bei der Untersuchung von Trends in der NLC-Höhe bzw. der Temperatur der oberen Atmosphäre ist daher das genaue Verständnis der Methoden zur Bestimmung von NLC und einer Abschätzung der Genauigkeit und Fehler der Methoden.

In den folgenden Kapiteln wird daher zunächst ein Überblick über die bekannten Methoden und eine neue Umsetzung mithilfe frei verfügbarer Softwaremodule gegeben. Anschließend wird diese Methode auf die NLC-Beobachtung mit automatisierten, hochauflösenden Kameras des IAP angewendet.

## Kapitel 2.

## Bestimmung der Höhe von NLC

#### 2.1. Historische Beobachtungen

Leuchtende Nachtwolken sind verglichen mit anderen Himmelserscheinungen wie z.B. Polarlichtern noch nicht lange bekannt. Die erste Beobachtung überhaupt stammt aus dem Jahr 1885 und wurde unabhängig voneinander von Backhouse [1], Leslie [14] und Jesse [10] beschrieben. An dieser Stelle soll zunächst eine Übersicht über historische Beobachtungen in ganz Europa gegeben werden. Danach wird konkret auf die Beobachtungen durch Otto Jesse im Großraum Berlin und die Arbeit von Norbert Auff'm Ordt in Mecklenburg-Vorpommern eingegangen, da diese sich erstmals bzw. besonders ausführlich mit der Bestimmung der Höhe der Wolken auseinandergesetzt haben (Jesse siehe [11], Auff'm Ordt siehe [17], [16]).

#### Übersicht über historische Beobachtungen und Methoden

Die folgende Übersicht enthält eine Auswahl der Veröffentlichungen, die sich in der Vergangenheit bereits mit der Höhenbestimmung von NLC aus Kamerafotos beschäftigt haben und deren Methoden zu Beginn dieser Arbeit nachvollzogen wurden. Die Methoden unterscheiden sich insbesondere in den Bedingungen, unter denen die Daten gewonnen werden. Das bedeutet einerseits im Abstand der Beobachtungsorte voneinander, andererseits in der Art und Weise der Synchronisation der Aufnahmen. Bezüglich der Auswertungsmethode kann die Klassifikation von Gadsden und Taylor 1994 [9] verwendet werden. Sie unterscheiden zwischen Punkt-, Linien- und Flächenmessungen. Im Fall einer Punktmessung wird ein bestimmter Punkt der NLC von bei-

den Orten aus mit Azimuth- und Elevationswinkel vermessen und aus den Winkeln dann die Höhe berechnet. Angewandt wurde dieses Vorgehen z. B. von Jesse. Im Fall der Linienmessung wird ein für die beiden Kamerastandorte spezifisches System von Polarkoordinaten definiert, das sich an deren Verbindungslinie orientiert. Diese Polarkoordinaten werden dann als Gitter über beide Fotos gelegt. Der übereinstimmende Punkt wird danach ausgesucht, dass er den gleichen Azimuthwinkel in diesem Polarkoordinatensystem besitzt. Neben diesem Azimutwinkel wird dann der Unterschied der Elevationswinkel von beiden Standorten aus vermessen. Diese Methode wurde von Størmer entwickelt (siehe Størmer 1933 [22]) und bietet verglichen mit Punktmessungen eine höhere Genauigkeit. Sie wurde allerdings nach Størmer nicht mehr verwendet oder gar weiterentwickelt, sondern aufgrund der fortschreitenden technischen Möglichkeiten von der sog. Flächenmethode abgelöst. Diese dritte Methode stammt von Taylor et al. 1984 [23] und ist eine iterative Methode. Es werden NLC-Punkte im Bild eines Standorts vermessen, unter Annahme einer bestimmten Höhe in geographische Koordinaten umgerechnet, und die zugehörigen Azimuth- und Elevationswinkel für den anderen Standort berechnet. Durch Variation der Höhe kann die beste Übereinstimmung zwischen Rechnung und Bild gefunden werden. Aufgrund des großen Rechenaufwands ist für diese Methode die Verwendung von Computern zwingend notwendig, während die ersten beiden Verfahren problemlos ohne Computer eingesetzt werden können. Es wird empfohlen, fest installierte Kameras anstelle von mobilen Amateurphotographien zu verwenden, da die Ausrichtung der Kameras anhand von Sternen dann auch zu anderen Zeiten bestimmt werden kann, zu denen mehr Sterne sichtbar als während des Auftretens von NLC.

Punktmessungen sind in der Tabelle mit I, Linienmessungen mit II und Flächenmessungen mit III gekennzeichnet. Die Wiedererkennung von Strukturen erfolgt ausschließlich per Augenmaß, eine automatisierte digitale Methode ist in keiner der Veröffentlichungen zu finden.

Zusätzlich zu den Veröffentlichungen, die tatsächlich Höhenbestimmungen ausführen, sind in der Tabelle zwei aufgelistet, die unter Annahme einer konstanten Höhe die Wolken auf eine Landkarte projizieren und anschließend die Strukturen analysieren.

Referenz	Zeitraum	Ort, Kamerastandorte	Höhe	Methode	Art der Zeit-	Entfernung
		(Anzahl)			synchronisation	der Standorte
Jesse	1889–	Steglitz, Nauen,	(82,080±	Photographie	Abschätzung	ca. 35 km
[11]	1891	Rathenow, Berlin (4)	0,009) km	Ι	$\Delta t < 2 \mathrm{s}$	
Størmer	10.07.+	Oslo, Kongsberg, Lille-	81,4 km	Photographie	telefonische	zw. 65 und
[22]	24.07.	hammer, Drøbak (4)		II	Absprache	161 km
	1932	(Südnorwegen)				
Witt	10./11.08.	Torsta, Mårdsjön	(81,1±0,5) km	analoge	VHF Radio	51,5 km
[24]	1958	(Schweden) (2)	bis (85,5±0,5) km	Photogram-	Kommunikation	
			für versch. Bilder	metrie		
Auff'm Ordt	1967–	Ranzow, Juliusruh (Rüg.),	82,5–	Methode nach	Funksprechgeräte	zw. 16,4
[16]	1972	Dornbusch (Hiddens.) (3)	83,5 km	Burov, 1959; I	$(\Delta t < 0,5 s)$	und 33,4 km
Taylor	11.07.	Aberdeen (TV-Kam.),	(82±1) km	Photographie	UT-Anzeige im Fens-	195 km
[23]	1979	Milngavie (Photokam.) (2)		III	ter der TV-Kam.	
Gadsden	1983–	Schottland: Aberdeen,	(89,8±1,8) km	Photographie	Auslösen zu festen	zw. 75
[9]	1986	Joppa, Milngavie (3)		III	Zeiten (alle 15 min)	und 195 km
Dalin	19.07.	Krasnogorsk, Obninsk	82,7–85,2 km	Methode nach	automatisierte Ka-	91,25 km
[6]	2013	(bei Moskau) (2)	$(\pm 0,395{ m km})$	Burov, 1959; I	meras (1 Bild/Min.)	
Pautet	2004–	Stockholm (1)	82,5 km	Projektion d.	-	-
[18]	2008		(Annahme)	Fotos auf Karte		
Baumgar-	24.06.+	Kühlungsborn (1),	83 km	Projektion d.	-	-
ten [2]	01.08.2009	Trondheim (1)	(Annahme)	Fotos auf Karte		

Im Folgenden werden zunächst die ersten Messungen der NLC-Höhe vorgestellt und schließlich anhand der ausführlichen Beschreibung von Auff'm Ordt die Methode nach Burov (1959) dargestellt.

#### Erste Beobachtungen durch Otto Jesse

Leuchtende Nachtwolken wurden durch Otto Jesse erstmals in der Nacht vom 23. auf den 24. Juni 1885 von Steglitz bei Berlin aus beobachtet. Sein Interesse galt zuvor bereits der Bestimmung von Höhe und Lage von Polarlichtern, daher konnte er die dort angewandten Methoden sehr schnell und professionell auf die Vermessung der leuchtenden Nachtwolken übertragen. Ebenso richtete er sofort die Aufforderung an alle Sternwarten, meteorologischen Institute und Seefahrer weltweit, Beobachtungen von leuchtenden Nachtwolken unter Angabe der Beobachtungszeit und des Beobachtungsortes als Länge und Breite zu melden (alle Angaben auf einige Minuten genau). Besonders erwünscht seien auch Beschreibungen der Form und Farbe (inkl. spektroskopische Verfahren) sowie die Messung des höchsten Erhebungswinkels, unter dem die Wolke beobachtet wird.

In den darauf folgenden Jahren wurden von bis zu vier verschiedenen Orten in der Region Berlin (52° 27' N) aus von mehreren Personen Fotos gleichzeitig gemacht. Wie diese Gleichzeitigkeit erzielt wurde, spart Jesse leider aus, er schätzt die Differenzen jedoch als geringer als zwei Sekunden ein. Die erste Höhenabschätzung (veröffentlicht 1885 [10]) ergab 60 km und geschah auf der Grundlage der Messung, wo die Wolke in den Erdschatten eintaucht und damit unsichtbar wird (siehe Abb. 1.3).

Die erste umfangreiche Höhenbestimmung veröffentlichte Jesse 1896 in den Astronomischen Nachrichten [11]. Sie enthält einen Datensatz von 287 bestimmten Höhen aus 24 Bildpaaren, die in den Jahren 1889-1891 aufgenommen und anschließend gemittelt wurden. Die Präzision des Ergebnisses ist mit  $82,080\pm0,009$  km beachtlich.

#### Beobachtungen in Mecklenburg-Vorpommern durch Norbert Auff'm Ordt

Bereits vor der Gründung des Instituts für Atmosphärenphysik Kühlungsborn (IAP) gab es in Mecklenburg-Vorpommern eine Außenstelle des Zentralinstituts für solarterrestrische Physik (Heinrich-Hertz-Institut) Berlin, zur Akademie der Wissenschaften der DDR gehörend. Im Jahr 1968 schrieb dort Norbert Auff'm Ordt seine Diplomarbeit an der Universität Rostock über die "Erprobung optischer Systeme und Filmsorten zur Beobachtung von Erscheinungen des Dämmerungs- und Nachthimmels" [17], 1973 folgte die Dissertation mit dem Titel "Der Nachweis von Wellen in der Mesopause und deren mögliche Quellen" [16]. In seiner Diplomarbeit nutzte Auff'm Ordt Fotos von einer Station und zur Auswertung eine von Chamberlain 1961 entwickelte Methode, die an die Vermessung des Erdschattens anknüpft, die auch von Otto Jesse verwendet worden war. Darauf soll hier jedoch nicht näher eingegangen werden, da für diese Arbeit Fotos von mehreren Stationen zur Verfügung stehen. In diesem Fall kann die Dissertation herangezogen werden. In den Jahren 1967–1972 gab es jeden Sommer vom 1. Juni bis zum 15. August einen Beobachter, der in der Zeit, in der die Sonne zwischen -6° und -16° unter dem Horizont steht, nach leuchtenden Nachtwolken Ausschau hielt. Die Aufnahmezeitpunkte wurden zwischen den verschiedenen Stationen mit Funksprechgeräten abgestimmt, die erzielte Auslösezeitdifferenz war so kleiner als 0,5 s. Die Belichtungszeit wurde sonnenstandsabhängig angepasst. Auff'm Ordt nutzte damals Kameras an folgenden drei Stationen:

- Leuchtturm Dornbusch, Hiddensee: 13° 7,2′ E, 54° 36,2′ N
- Juliusruh, Rügen: 13° 22,5′ E, 54° 37,8′ N
- Ranzow, Rügen: 13° 38,2' E, 54° 35,2' N

Die Basislänge des Abstands der Stationen beträgt zwischen 16,4 km und 33,4 km, die Azimuthwinkel dieser Verbindungslinien zwischen den Stationen ( $\beta$ ,  $\beta^*$ ) ließ er sich vom seehydrographischen Dienst der DDR geben. Zur Messung der Winkel, unter denen die Wolkendetails zu sehen sind, dient die Orientierung an Sternen, und zwar speziell an Sternen aus den Sternbildern Major, Auriga und Perseus. Die Bilder werden auf ein Koordinatensystem projiziert, in dem dann sowohl Stern- als auch Wolkenkoordinaten abgelesen werden können. Die von Auff'm Ordt verwendete Geometrie ist in Abb. 2.1 abgebildet, in der auch die im Folgenden verwendeten Symbole definiert werden. Zusätzlich bezeichnet  $h_{LNW}^A$  den Elevationswinkel der LNW vom Standort A aus gesehen (B analog). Zwischen den Winkeln bestehen die folgenden Zusammenhänge:

$$\Psi_A = \beta - A^A_{LNW}, \quad \Psi_B = \beta^* - A^B_{LNW}$$

Zur Berechnung des Winkels  $\lambda$  muss nun der sphärische Exzess  $\epsilon$  berücksichtigt werden, der den Überschuss der Winkelsumme im sphärischen Dreieck, verglichen mit der



**Abbildung 2.1.:** Geometrie der Beobachtung von leuchtenden Nachtwolken (LNW) nach Auff'm Ordt 1973 [16]: Die Wolke wird z.B. von der Station A aus unter dem Azimuth  $A_{LNW}^A$  gesehen, der Punkt P ist die Projektion des Wolkendetails auf die Kugeloberfläche.

im euklidischen Dreieck, angibt.  $\epsilon$  ist proportional zum Flächeninhalt des Dreiecks und umgekehrt proportional zum Quadrat des Kugelradius R. Damit erhält Auff'm Ordt

$$\epsilon = \frac{\rho}{4R^2} \frac{S^2 \cdot \sin(\Psi_A) \sin(\Psi_B)}{\sin(\Psi_A + \Psi_B)} = 1,2655 \cdot 10^{-3} \frac{S^2 \cdot \sin(\Psi_A) \sin(\Psi_B)}{\sin(\Psi_A + \Psi_B)}$$

Für den Winkel $\lambda$ gilt dann

$$\lambda = 180^{\circ} - \Psi_A - \Psi_B + \epsilon \tag{2.1}$$

Mit dessen Hilfe lässt sich dann die Länge der Strecken  $S_A$  und  $S_B$  angeben. In den folgenden Gleichungen sind mit  $\underline{S}_A$ ,  $\underline{S}_B$  und  $\underline{S}$  die zugehörigen Winkel gemeint, die Umrechnung erfolgt durch  $S_A = \underline{S}_A \cdot R$ .

$$\sin(\underline{S}_{\underline{A}}) = \frac{\sin(\underline{S})\sin(\Psi_B)}{\sin(\lambda)}, \quad \sin(\underline{S}_{\underline{B}}) = \frac{\sin(\underline{S})\sin(\Psi_A)}{\sin(\lambda)}$$

Die verwendete Formel zur Bestimmung der Höhe  $H_{LNW}$  stammt von Burov (1959) und enthält die Näherung, dass die Differenz  $\Delta \varphi$  der beiden Breitengrade von Kamera und LNW klein ist. Nur dann darf die Kleinwinkelnäherung  $\tan(\Delta \varphi) \approx \Delta \varphi$  verwendet und die Strecke  $S_A$  als Kathete des Dreiecks mit dem Elevationswinkel  $h_{LNW}^A$  eingesetzt werden. Für die Beobachtung leuchtender Nachtwolken ist diese Annahme immer zulässig. Die Höhe  $H_{LNW}^A$  lautet für Station A (Station B analog):

$$H_{LNW} = S_A \cdot \tan(h_{LNW}^A) + S_A^2 \frac{1-K}{2R} + z$$
(2.2)

Der zweite Term dient zur Berücksichtigung der Refraktion, Auff'm Ordt bezieht sich hier auf eine Publikation von Kutusow (1971) und setzt  $K=0,14\pm0,03$ . Die Höhe z ist die Höhe der Kamera über dem Meeresspiegel. Eine Berücksichtigung der Ellipsoidform der Erde gibt es bei Auff'm Ordt insofern, als dass er einen Krümmungsradius von R=6385 km wählt.

Auff'm Ordt konnte in insgesamt 28 Nächten leuchtende Nachtwolken photographieren und daraus 420 Höhen bestimmen. Sein Ergebnis bestätigt die ca. 80 Jahre älteren Angaben Otto Jesses sehr gut, Auff'm Ordt fand ein deutliches Hauptmaximum in der Häufigkeitsverteilung zwischen 82,5 km und 83,5 km. Außerdem diskutiert er das Auftreten zweier kleinerer Nebenmaxima bei 88,5 km und 77,5 km, einen Mittelwert aller bestimmten Höhen gibt Auff'm Ordt nicht an.

#### 2.2. Verwendete Koordinatensysteme

Im Unterschied zur Situation 1972 ist es dank frei verfügbarer Softwaremodule heute einfacher, mit den Koordinaten auf dem Erdellipsoiden zu rechnen. Für diese Arbeit wird daher das Referenzellipsoid des World Geodetic System 1984 (WGS84) verwendet [25]. Sein Ursprung ist der Massenschwerpunkt der Erde, daher ist es ein geozentrisches System. Die Entwickler des WGS84 unterscheiden zwischen drei verschiedenen Oberflächen: der Topographie der Erde, einer mathematisch-geometrischen Referenzbeschreibung durch einen Ellipsoiden und der Gravitations-Äquipotentialfläche, dem Geoid. Für die vorliegende Arbeit werden die Koordinaten auf der zweiten genannten Oberfläche, dem Referenzellipsoiden benötigt. Dieser wird durch vier Parameter bestimmt: seine große Halbachse mit einer Länge von a=6378,137 km, seine Abplattung 1/f=298,257223563, das Produkt der universellen Gravitationskonstante mit der Erdmasse und die Winkelgeschwindigkeit der Erddrehung, wobei die Werte der beiden zuletzt genannten keine Relevanz für diese Arbeit besitzen. Die Positionen der Kameras wurden mit GPS-Geräten vermessen, ihre Höhe wird als Höhe über dem Referenzellipsoiden angegeben. Es bietet sich an, die Rechnungen mithilfe von analytischer Geometrie durchzuführen in einem geozentrischen Koordinatensystem, dessen Ursprung mit dem des Referenzellipsoiden übereinstimmt. Die x-Achse des Systems zeigt in Richtung des Nullmeridians, die y-Achse in Richtung des 90° E-Meridians und die z-Achse in Richtung des geographischen Nordpols.

## 2.3. Bestimmung der Höhe aus den Kamerapositionen und Winkeln

Die beiden Kamerapositionen werden zunächst von den ursprünglich bekannten geographischen Koordinaten in die geozentrischen Koordinaten umgerechnet. Die Lage der beiden Koordinatensysteme ist in Abb. 2.2 skizziert. Die für die Transformation verwendete Funktion rechnet mit der Form des WGS84-Referenzellipsoiden und wird ebenso der Python-Bibliothek pyproj entnommen wie die später benutzte Funktion für die umgekehrte Transformation. Anschließend werden zwei Geraden definiert, die jeweils von der Kamera zum gewählten NLC-Punkt zeigen. Aus dem Azimuthwinkel  $\alpha$ und dem Elevationswinkel  $\epsilon$  lassen sich aus einfachen geometrischen Überlegungen (siehe Abb. 2.3) die Blickrichtungen  $\vec{g_1}'$ ,  $\vec{g_2}'$  von der Kamera zum NLC-Punkt bestimmen:

$$\vec{g_1}' = \begin{pmatrix} -\cos(\alpha_1) \\ \sin(\alpha_1) \\ \tan(\epsilon_1) \end{pmatrix}, \quad \vec{g_2}' = \begin{pmatrix} -\cos(\alpha_2) \\ \sin(\alpha_2) \\ \tan(\epsilon_2) \end{pmatrix}$$
(2.3)

Mit aus der linearen Algebra bekannten Methoden wird nun der Schnittpunkt der beiden Geraden ermittelt. Dazu werden zunächst die Koordinaten aller benötigten Positionen und Vektoren in das geozentrische Koordinatensystem umgewandelt. Das Vorgehen hierbei geschieht in Anlehnung an das von Nagel angewandte Verfahren bei der Bestimmung von Feuerkugelkoordinaten (Nagel 2011 [15]). Die Vektoren  $\vec{e_x'}$  und  $\vec{e_z'}$  der Achsen des lokalen Koordinatensystems müssen dafür zuerst normiert werden, damit sie als Einheitsvektoren verwendet werden können (heißen danach  $\vec{e_x}, \vec{e_z}$ ).



**Abbildung 2.2.:** Geozentrisches und lokales Koordinatensystem: Die Achsen des geozentrischen Systems sind durch x,y,z beschrieben, während x',y' und z' das lokale Koordinatensystem bezeichnen.  $\varphi$  und  $\lambda$  sind die Breite und Länge der Kameraposition.



**Abbildung 2.3.:** Winkel im lokalen Koordinatensystem: S ist der Standort der Kamera,  $\alpha$  und  $\epsilon$  sind Azimuth und Elevation, unter denen die NLC beobachtet wird. L ist die Projektion des NLC-Punktes in die Horizontebene der Kamera, E zusätzlich in deren Breitengrad.

Die Rotationsmatrix M lautet dann wie folgt:

$$m_z = \tan(\varphi), \quad m_x = -\frac{1}{m_z}$$

$$\vec{e_x'} = \begin{pmatrix} \cos(\lambda) \\ \sin(\lambda) \\ m_x \end{pmatrix}, \quad \vec{e_z'} = \begin{pmatrix} \cos(\lambda) \\ \sin(\lambda) \\ m_z \end{pmatrix}, \quad \vec{e_y} = \vec{e_z} \times \vec{e_x}$$

$$M = \begin{pmatrix} e_{xx} & e_{yx} & e_{zx} \\ e_{xy} & e_{yy} & e_{zy} \\ e_{xz} & e_{yz} & e_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(\varphi)\cos(\lambda) & -\sin(\lambda) & \cos(\varphi)\cos(\lambda) \\ \sin(\varphi)\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & \cos(\varphi)\sin(\lambda) \\ -\cos(\varphi) & 0 & \sin(\varphi) \end{pmatrix}$$
(2.4)

Die Verbindungsgeraden zwischen NLC-Punkt und Kameraposition lauten dann:

$$\vec{g_1} = M \cdot \vec{g_1}', \quad \vec{g_2} = M \cdot \vec{g_2}'$$

Ihr Schnittpunkt, d.h. die Position der NLC  $\vec{X}_{\text{NLC}}$ , wird mithilfe der Funktion np.linalg.lstsq(a,b) der numpy-Bibliothek ermittelt. Die Gleichung wird dazu auf die Form  $A\vec{x} = \vec{b}$  gebracht.  $\vec{X}_{\text{Cam1}}$  und  $\vec{X}_{\text{Cam2}}$  sind die Positionen der beiden Kameras.  $k_1$  und  $k_2$  geben die Länge des Sehstrahls von der Kamera zur NLC an.

$$\vec{X}_{\text{NLC}} = \vec{X}_{\text{Cam1}} + k_1 \cdot \vec{g}_1 = \vec{X}_{\text{Cam2}} + k_2 \cdot \vec{g}_2$$
 (2.5)

$$\begin{pmatrix} -g_{11} & g_{21} \\ -g_{12} & g_{22} \\ -g_{13} & g_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \end{pmatrix} = \vec{X}_{\text{Cam1}} - \vec{X}_{\text{Cam2}}$$
(2.6)

Da man hier aus drei Gleichungen zwei Parameter bestimmt, ist das Gleichungssystem überbestimmt. Zur Lösung wird daher ein least-square-Algorithmus verwendet. Sofern es einen Schnittpunkt beider Geraden gibt, wird dieser durch das Einsetzen der Parameter  $k_1$ ,  $k_2$  in die Gleichung 2.5 ermittelt. Ansonsten erhält man auf diese Weise zwei Punkte, deren Abstand der geringste Abstand zwischen den beiden Geraden ist. Aus dem Höhenunterschied dieser beiden Punkte kann auf den Messfehler geschlossen werden. Die Position des Schnittpunkts und damit der NLC muss schließlich noch von den geozentrischen in die geographischen Koordinaten am Ort der NLC umgewandelt werden, um deren Höhe angeben zu können.

### 2.4. Bestimmung der Beobachtungswinkel aus Kamerapositionen und bekannter NLC-Position

Die folgende Rechnung wurde durchgeführt, um die Richtigkeit der in 2.3 beschriebenen Funktion zu prüfen. Es wird neben den Kameraorten nun auch ein Ort der NLC angenommen, alle drei werden wieder zuerst von den geographischen in die geozentrischen Koordinaten überführt.  $\varphi$  bezeichnet die geographische Breite,  $\lambda$  die Länge. Für die beiden Kamerastandorte wird die Horizontebene durch ihren Normalenvektor definiert. Dieser entspricht der lokalen z-Achse und lautet

$$\vec{n} = \left(\begin{array}{c} \cos(\lambda) \\ \sin(\lambda) \\ \tan(\varphi) \end{array}\right)$$

Für die weiteren Winkelberechnungen ist es nützlich, die Ebene in der Hesseschen Normalenform anzugeben, d.h. in der Form  $n_1x_1 + n_2x_2 + n_3x_3 + n_0 = 0$ , wobei  $|\vec{n}| = 1$ . Dann berechnet sich der Abstand *s* des NLC-Punktes von der Horizontebene der Kamera wie folgt, wobei  $\vec{c}$  die Position der NLC angibt und sich der Parameter  $n_0$  durch Einsetzen des Kamerastandorts in die Gleichung  $n_1x_1 + n_2x_2 + n_3x_3 + n_0 = 0$  ergibt:

$$s = \frac{\vec{c}\,\vec{n} + n_0}{|\vec{n}|}$$

Damit ist die Projektion des NLC-Punktes in die Horizontebene der Kamera möglich

(siehe Abb. 2.3). Mithilfe der Koordinaten dieses Lotfußpunktes L und dessen Projektion auf die lokale y-Achse E können alle Strecken berechnet werden, die zur Bestimmung von Azimuth  $\alpha$  und Elevation  $\epsilon$  bekannt sein müssen. Sei d die Entfernung zwischen Kamera und Lotfußpunkt, l die Entfernung zwischen E und L und s der Abstand der NLC von der Horizontebene der Kamera, dann gilt:

$$\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha) = \frac{l}{d} \tag{2.7}$$

$$\tan(\epsilon) = \frac{s}{d} \tag{2.8}$$

Die beiden hier beschriebenen Funktionen werden in Kapitel 4.3 zum Einsatz kommen, dort wird dann zusätzlich noch die Refraktion eingearbeitet werden.

#### 2.5. Bestimmung des Streuwinkels

Der Streuwinkel bezeichnet den Winkel, unter dem von der Sonne kommendes Licht durch die Wolke abgelenkt wird. Er ist von Interesse, da die Intensität des gestreuten Lichts durch den differentiellen Streuquerschnitt  $\frac{d\sigma}{d\Omega}|_{\gamma}$  gegeben ist und sowohl eine Abhängigkeit vom Streuwinkel  $\gamma$  als auch eine Abhängigkeit von der Teilchengröße besitzt. Der Streuwinkel muss also bekannt sein, um die Informationen über die Helligkeit der NLC zur Abschätzung der Teilchengröße unter Annahme einer bestimmten Teilchengeometrie nutzen zu können.

Eine Skizze zur Kennzeichnung der verwendeten Winkel ist in Abb. 2.4 zu finden. Es wird wieder mit Geraden gearbeitet, deren Schnittwinkel berechnet werden soll. Diesmal geht es im Unterschied zur bisherigen Methode jedoch um die Beobachtung von einer Station aus. Die Position der NLC wird daher als bekannt vorausgesetzt und z.B. durch die Verwendung von zwei Kameras bestimmt.

Es wird ein Richtungsvektor  $\vec{v_1}$  von der NLC zur Sonne im lokalen Koordinatensystem der NLC aufgestellt und dieser anschließend mittels der Rotationsmatrix  $M_1$  (siehe Abschnitt 2.3, Gleichung 2.4) in das geozentrische Koordinatensystem überführt.  $\alpha_{sun}$ bezeichnet den Azimuthwinkel, unter dem im lokalen Koordinatensystem der NLC die Sonne beobachtet wird. Analog wird ein Richtungsvektor  $\vec{v_2}$  von der Kamera zur NLC im lokalen Koordinatensystem der Kamera aufgestellt und mittels der Rotationsmatrix



- **Abbildung 2.4.:** Geometrie der Streuung von Sonnenlicht durch NLC zur Kamera:  $\epsilon'$  ist der Elevationswinkel der Sonne vom Ort der NLC aus,  $\epsilon$  ist der Elevationswinkel, unter dem die NLC von der Kamera aus beobachtet wird.  $\gamma$  ist der Streuwinkel.
- $M_2$  ins geozentrische System transformiert.

$$\vec{v_1} = \begin{pmatrix} -\cos(\alpha_{\text{sun}}) \\ \sin(\alpha_{\text{sun}}) \\ \tan(\epsilon') \end{pmatrix}, \quad \vec{v_1'} = M_1 \cdot \vec{v_1}, \quad \vec{v_2} = \begin{pmatrix} -\cos(\alpha_{\text{NLC}}) \\ \sin(\alpha_{\text{NLC}}) \\ \tan(\epsilon) \end{pmatrix}, \quad \vec{v_2'} = M_2 \cdot \vec{v_2}$$

Der Schnittwinkel  $\gamma$  wird dann mittels folgender Formel bestimmt:

$$\cos(\gamma) = \frac{\vec{v_1}' \cdot \vec{v_2}'}{|\vec{v_1}'| \cdot |\vec{v_2}'|}$$
(2.9)

## Kapitel 3.

## **NLC-Kameranetzwerk und Daten**

#### 3.1. NLC-Kamera-Netzwerk des IAP Kühlungsborn

Die Aufnahmen, die in dieser Arbeit ausgewertet werden, stammen aus dem NLC-Kamera-Netzwerk des IAP Kühlungsborn. Dieses umfasst mehrere hochauflösende Kameras, die rund um die Uhr und das ganze Jahr lang automatisiert Fotos machen, die dann auf einem Computer gespeichert und an das IAP gesendet werden. Die Belichtungszeit wird dabei automatisch gewählt und hat ihrerseits einen Einfluss darauf, in welchen Intervallen die Bilder gemacht werden. Die Intervalle liegen typischerweise zwischen 20 und 40 Sekunden. Jeden Mittag um 12 Uhr UT werden die Daten des vergangenen Tages (12:00-12:00) vom Computer direkt bei der Kamera in einem Ordner abgespeichert. Die Dateinamen geben die Aufnahmeuhrzeit in Universal Time (UT) wieder. Ergänzend werden alle Bilder zu einem Zeitraffer-Film zusammengefasst, sodass schnell ein Überblick darüber gewonnen werden kann, ob in der vergangenen Nacht NLC zu sehen waren.

Standorte der Kameras befinden sich in ganz Europa, wobei der Schwerpunkt auf Nordeuropa liegt, da dort die meisten NLC-Sichtungen zu erwarten sind. Die südlicheren Kameras, z. B. in Frankreich und Spanien, dienen der Untersuchung der Frage, ob und wie häufig in diesen Breiten überhaupt NLC auftreten.

Die beiden für diese Arbeit relevanten Kameras sind eine Kamera auf dem Dach des Instituts für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) und eine Kamera auf dem Dach des IAP selbst. Ihre geographischen Koordinaten wurden vor Beginn der NLC-Saison im Frühjahr 2016 mit einem speziellen GPS-Gerät vermessen, das sogar Korrekturen hinzufügen kann, die durch den Zustand der Ionosphäre zum Messzeitpunkt nötig werden. Die Genauigkeit der Messung beträgt 10 cm in horizontaler und vertikaler Richtung. Die Koordinaten lauten:

- KBORN: 54,116948° N, 11,7720° E, 85,486 m ü.NN, 124,071 m ü. WGS-84-Ellipsoid
- IOW: 54,179412° N, 12,081234° E, 21,889 m ü.NN, 60,085 m ü. WGS-84-Ellipsoid

Die beiden Kameras sind baugleich, und zwar das Modell Canon-EOS-550d mit einer Linse der Brennweite 28 mm.

#### 3.2. Anzahl der NLC-Sichtungen, Auswahl der Daten

Für diese Arbeit stehen Bilder aus den Jahren 2013 bis 2015 zur Verfügung. Außerdem gibt es bereits Tabellen, die aufzeigen, in welchen Nächten NLC beobachtet werden konnten. Das angegebene Datum entspricht dem Datum des folgenden Morgens, da an diesem Tag die Bilder der vergangenen Nacht abgespeichert werden. Aufgelistet werden hier nun die Nächte, in denen von beiden Kameras (IOW und KBORN) NLC aufgenommen wurden.

Jahr	Datum	KBORN	IOW
2013	04.06.13	21:55-0:50	21:45-0:40
	05.06.13	23:00-1:15	22:00-1:20
	09.06.13	21:40-1:10	21:35-1:08
	10.06.13	21:10-0:55	21:00-1:40
	11.06.13	20:55-21:40	20:45-21:50
		0:35-1:25	0:20-1:20
	24.06.13	22:45-23:40	21:55-0:00
	28.06.13	22:00-0:00	22:00-0:15
	30.06.13	22:15	21:50-22:20
	08.07.13	21:30-22:40	21:30-23:00
	18.07.13	20:30-2:00	20:40-2:00
	21.07.13	21:10-2:15	20:50-2:15
	23.07.13	21:40-2:00	0:00-1:55
2014	31.05.14	[Zeitangabe fehlt]	21:00-22:50
	10.06.14	20:50-0:00	20:50-0:00
	15.06.14	21:55-23:15	21:50-23:15
	17.06.14	22:20-1:28	22:50-1:16
	27.06.14	22:30-1:45	22:30-1:45
	01.07.14	22:25-0:50	22:40-23:06
	03.07.14	21:40-23:30	21:20-23:30
	07.07.14	21:20-1:40	21:20-1:40
	08.07.14	23:00-1:10	23:00-1:10
	11.07.14	22:15-1:15	22:15-1:15
	12.07.14	21:55-1:55	21:55-1:55
	18.07.14	22:00-1:40	22:00-1:40
	19.07.14	21:20-22:30	21:20-22:30
		23:50-0:50	23:50-0:50
	22.07.14	20:45-2:05	20:45-2:05
	23.07.14	21:18-22:50	21:15-0:50
	24.07.14	20:40-22:30	20:50-1:05
		23:55-0:50	

Jahr	Datum	KBORN	IOW
2015	07.06.15	22:25-1:30	22:25-1:30
	12.06.15	22:45-1:05	23:15-0:50
	17.06.15	21:15-0:38	21:11-0:30
	01.07.15	21:20-1:40	21:20-1:40
	09.07.15	22:11-22:39	22:16-22:47
	11.07.15	20:35-1:40	20:35-1:40
	17.07.15	22:50-1:15	22:20-1:15
	18.07.15	0:24-1:37	21:10-22:00
			0:25-1:40
	19.07.15	21:32	21:10-22:50
	22.07.15	21:35-1:02	21:29-1:12
	24.07.15	20:55-22:17	20:45-1:10
		0:22-01:09	

Schließlich wurde zur Analyse der Höhenbestimmung die Nacht vom 10. zum 11. Juli 2015 ausgewählt. Die NLC zeigen in dieser Nacht besonders ausgeprägte Bandstrukturen und sind über eine sehr lange Zeit hinweg in guter Helligkeit zu sehen (20:35–01:40 UT). Die große Helligkeit erleichtert die Wiedererkennung von Strukturen in mehreren Bildern, die zur Höhenbestimmung durch Triangulation zwingend notwendig ist.

## Kapitel 4.

## Auswertungsmethode

#### 4.1. Verwendete Programmiersprache, Pakete

Die verwendete Programmiersprache für alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen ist Python, eine Open Source-Sprache. Die wichtigsten verwendeten Pakete sind im Anhang A.1 aufgeführt.

#### 4.2. Ausrichtung und Blickfeld der Kamera

Die Ausrichtungen der Kameras sowie ihr Blickfeld müssen anhand von Sternen kalibriert werden. Hierbei kommt dem Aufnahmezeitpunkt eine besondere Bedeutung zu: Angenommen, die Uhrzeit sei exakt bekannt und es könnten mindestens zwei Sterne in einem Foto eindeutig identifiziert werden, dann würden genau diese Angaben zur Bestimmung der Ausrichtung ausreichen. Ergänzend muss dabei auch die Umwandlung der Pixelkoordinaten in Azimuth- und Elevationswinkel bekannt sein, d.h. die Abbildung der Kamera.

Im vorliegenden Datenmaterial musste leider festgestellt werden, dass die Uhrzeiten nicht als exakt gelten können. Die Uhr des Computers hinter der Kamera wurde nicht häufig genug mit der Universal Time synchronisiert und weist deshalb Abweichungen von bis zu 90 s auf. Eine Alternative zur Bestimmung der Aufnahmezeit aus den Dateinamen, die von der Uhr des Computers abhängen, bietet die Verwendung der EXIF-Daten, die im jpg-Format automatisch mitgespeichert werden. Sie beziehen sich auf die Uhr der Kamera, auf die allerdings bisher gar kein Wert gelegt wurde. Diese Uhr wurde in den relevanten Zeiträumen gar nicht synchronisiert und ging um bis zu zwei Stunden falsch. Also muss trotz bekannter Abweichungen mit den Angaben des Computers aus den Dateinamen gearbeitet werden.

Für die Ausrichtung der Kamera gibt es allerdings eine weitere Möglichkeit unter Berücksichtigung aller zur Verfügung stehenden Bilder. Mithilfe des Pakets PIL können zunächst die Bilder eines bestimmten Zeitraums (typischerweise 1h) überlagert werden, und zwar so, dass alle besonders hellen Punkte (d.h. hauptsächlich die Sterne) dargestellt werden. Auf diese Weise erhält man zahlreiche Sternspuren, deren Enden teilweise innerhalb und teilweise außerhalb des Blickfelds liegen. Mithilfe der Pakete ephem, astropy und pyproj kann dann die Soll-Position der Sternspur gemäß Sternkatalogen berechnet und angezeigt werden. Die verschiedenen Parameter, die die Darstellung charakterisieren, müssen nun so optimiert werden, dass tatsächliche und berechnete Sternspuren bestmöglich übereinander liegen. Die zu variierenden Parameter sind Azimuth und Elevation der optischen Achse der Kamera, ihr horizontales und vertikales Blickfeld und die Rotation des Blickfelds um die optische Achse.

# 4.3. Betrachtung zweier Bilder, Projektion auf eine Landkarte

Grundlage für die Höhenbestimmung per Triangulation ist ein Programm, das zwei gleichzeitig aufgenommene Bilder nebeneinander anzeigt. In beiden Bildern gibt es Cursor, die auf ein Objekt gerichtet werden können und miteinander so korreliert sind, dass unter Annahme einer bestimmten Höhe des Objekts über dem WGS84-Referenzellipsoiden der Cursor des einen Bildes auf dasselbe Objekt zeigt wie der des anderen Bildes. D.h. bei bekannter Ausrichtung und bekanntem Blickfeld der Kameras kann durch Variation der Höhe die beste Übereinstimmung für den anvisierten Punkt in beiden Bildern gefunden werden. Für eine detailliertere Betrachtung gibt es ein Fenster mit dem vergrößerten Ausschnitt rund um den Cursor herum in der rechten oberen Ecke. Für den Fall der besten Übereinstimmung werden die geographischen Koordinaten und die Höhe des Punktes in ein Tabellendokument gespeichert. Dort wird ebenso gespeichert, unter welchen Azimuth- und Elevationswinkeln der Punkt von beiden Stationen aus zu sehen war. Außerdem werden die Bilder zu allen ausgewählten Cursorpositionen ebenfalls gespeichert, damit die Auswahl der Punkte und ihre Übereinstimmung auch nachträglich noch nachvollzogen werden kann. Diese Methode entspricht im Prinzip einer Kombination der Methoden I und III der historischen



Abbildung 4.1.: Vergleich von Strukturen: Gleichzeitig aufgenommene Bilder werden nebeneinander dargestellt, der blau gezeichnete Cursor ist so korreliert, dass er auf dieselbe Struktur zeigt unter Annahme einer bestimmten Höhe derselben. Diese Höhe kann variiert werden, um die bestmögliche Übereinstimmung der Strukturen zu erzielen. Der blaue Kasten enthält jeweils Informationen über die Ausrichtung und Abbildung der Kamera, die rote Linie zeigt den Horizont. Im grauen Kasten sind die jeweiligen Beobachtungswinkel von der Kamera zur NLC sowie deren Position und der Streuwinkel angegeben.

Methoden zur Bestimmung von NLC-Höhen (Kap. 2.1).

Die atmosphärische Brechung wird durch zwei verschiedene Formeln einbezogen, solange die Ausgabe "Refraction: True" unter den Blickfeldangaben erscheint. Die erste Formel stammt von G. G. Bennett [5] und bietet eine Umwandlung des scheinbaren Elevationswinkels  $\epsilon_s$  in einen Brechungswinkel R, die andere stammt von Sæmundsson [21] und dient der Umrechnung des wahren Elevationswinkels  $\epsilon$  in den Brechungswinkel R. R muss vom scheinbaren Elevationswinkel abgezogen werden, um den wahren zu erhalten und umgekehrt dazu addiert werden.

$$R = \cot\left(\epsilon_s + \frac{7.31}{\epsilon_s + 4.4}\right) \tag{4.1}$$

$$R = 1.02 \cdot \cot\left(\epsilon + \frac{10.3}{\epsilon + 5.11}\right) \tag{4.2}$$

Die Projektion der vermessenen NLC auf eine Landkarte erfolgt mit einer Farbcodierung für die Höhen. Das hier beispielhaft auf die Karte projizierte Band ist dasselbe, das auch in der Bildmitte der Fotos in Abb. 4.1 zu sehen ist.



Abbildung 4.2.: Projektion vermessener Punkte auf eine Landkarte, NLC-Höhe bestimmt aus Stereo-Kamerabeobachtung am 10.07.2015

## Kapitel 5.

# Auswertung der NLC vom 10./11.07.15

## 5.1. Ausrichtung und Blickfeld der Kamera, Aufnahmezeiten

Ausrichtung und Blickfeld der Kameras werden mit der in Kap. 4.2 dargestellten Methode ermittelt. Das Ergebnis kann den folgenden Bildern 5.1 und 5.2 entnommen werden. Da beide Kameras baugleich sind und die gleiche Linse enthalten, wird entschieden, das Blickfeld gleich zu wählen. Als Überlagerungszeitraum für die in Kap. 4.2 beschriebene Methode wird die Zeit von 23 bis 24 Uhr gewählt. Die bestmögliche Übereinstimmung zwischen berechneten und photographisch aufgenommenen Sternspuren besteht bei einem Kamerablickfeld von 47,60° (horizontal) und 31,59° (vertikal). Dieses Blickfeld ist ca. 10% größer als das mittels paraxialer Optik aus Sensorgröße  $S=22,3 \times 14,9$  mm und Brennweite f=28 mm berechnete Blickfeld von  $43,43^{\circ} \times$ 29,8°. Dieser Berechnung liegt die folgende Formel für den Bildwinkel  $\delta$  in einer Dimension zugrunde, wobei d die Sensorlänge in dieser Richtung ist:  $\delta = 2 \arctan(\frac{d}{2t})$ . Der Unterschied ist zum einen durch die Annahme einer idealen Abbildung durch das Objektiv gegeben, zum anderen in der verwendeten Projektionsmethode (astropy.wcs - zenithal/azimuthal equidistant) sowie der Refraktion begründet. Die Verwendung ist dadurch legitim, dass sie die Spuren sehr gut wiedergibt und die Fehler einer eventuell nicht exakt zutreffenden Projektionsmethode ausgleicht. Dass diese nicht exakt ist, erkennt man daran, dass die Sternspuren aus den Bildern für beide Kameras länger ist als die berechnete. Im Fall der KBORN-Kamera ist nach jeder Seite der berechneten Spur



Abbildung 5.1.: Ausrichtung und Blickfeld der KBORN-Kamera, darunter Ränder einer Sternspur: die photographierte Spur überragt die berechnete um je einen Stern nach beiden Seiten

noch ein weiterer Stern zu sehen, d.h. einen zeitlichen Offset gibt es nicht. Anders sieht es für die IOW-Kamera aus: Dort sind rechts der berechneten Spur noch drei Sterne zu sehen, während sie die Kamera-Sternspur links um etwa einen Stern überragt. Das bedeutet, dass die IOW-Bilder später aufgenommen wurden als ihr Zeitstempel angibt. Die Zeitdifferenz zwischen zwei nacheinander aufgenommenen Bildern beträgt um 23 Uhr etwa 30 s, um 24 Uhr dann nur noch 20 s. Um zwei tatsächlich gleichzeitig aufgenommene Bilder aus Kühlungsborn und Warnemünde zu bekommen, muss also ein IOW-Bild gewählt werden, dessen Zeitstempel ca.  $\frac{3\cdot20 s}{2} \approx 30 s$  vor dem des KBORN-Bilds liegt. Wie die Liste dieser Bildpaare erzeugt wird, ist im Detail in Anhang A.2 beschrieben.



Abbildung 5.2.: Ausrichtung und Blickfeld der IOW-Kamera, darunter die Ränder einer Sternspur: die photographierte Spur überragt die berechnete um einen bzw. drei Sterne

#### Fehlerbetrachtung

Um den Fehler der iterativen Höhenbestimmungsmethode abzuschätzen, geht man davon aus, dass die Ungenauigkeit der Standortbestimmung der Kameras gegenüber den Fehlern der Beobachtungswinkel vernachlässigbar ist. Der Fehler in der bestimmten Höhe besitzt eine wesentliche Abhängigkeit von der Entfernung der Kamera zur NLC und damit auch vom Breitengrad der NLC und dem Elevationswinkel der Beobachtung. Daher betrachtet man eine Serie von NLC-Punkten, die alle in 82,5 km Höhe und 14° E geographischer Länge liegen, allerdings auf 50 verschiedenen Breitengraden zwischen 56,5° N und 61,5° N. Mithilfe des in Kap. 2.4 entwickelten Programms werden Quartette von Winkeln erzeugt und in einer Tabelle gespeichert, die zu diesen NLC-Punkten passen. Anschließend verändert man alle angenommenen Winkel einer der beiden Kameras, hier die der KBORN-Kamera, um einen bestimmten Betrag und berechnet mit dem in Kap. 2.3 beschriebenen Programm die beiden Höhen, die sich mit den Parametern  $k_1$  und  $k_2$  ergeben, sowie deren Differenz. Um die Elevationsabhängigkeit darzustellen, wird die Höhendifferenz gegen die (unveränderten) Elevationswinkel der IOW-Kamera aufgetragen.

Als nächstes ist jetzt also zu beurteilen, um wie viel die Elevations- und Azimuthwinkel verändert werden müssen, um den hier vorliegenden Fehler geeignet abzuschätzen. Die Fehler kommt zum einen durch Fehler in der Bestimmung der Ausrichtung der Kamera zustande, zum anderen durch Fehler bei der Auswahl identischer Punkte per Augenmaß. Ersterer liegt aufgrund der angewandten Methode in der Größenordnung, um die sich die Position eines Sterns innerhalb von 30 s ändert. Diese Änderung beträgt typischerweise etwa 0,1° im Azimuth und 0,03° in der Elevation. Diese Werte werden zur Berücksichtigung der zweiten Fehlerquelle verdreifacht. Nimmt man also einen Fehler des Elevationswinkels von +0,09° und einen Azimuthfehler von 0,3° an, so ergibt sich das folgende Diagramm 5.3.



Abbildung 5.3.: Elevationsabhängigkeit des Fehlers der Höhenbestimmung

Anzumerken bleibt, dass die Höhenbestimmung gegen Azimuthfehler wesentlich robuster ist als gegen Elevationsfehler. Ohne Vorhandensein eines Elevationsfehlers kommen bei einem Azimuthfehler von 0,3° nur Höhendifferenzen von 80 m bis maximal 350 m zustande. Deswegen wird auf eine Darstellung der Azimuthabhängigkeit verzichtet.

#### 5.2. Höhenbestimmung

Die Auswertung der Höhenbestimmung erfolgt in zwei Teilen: Zum einen werden Bildpaare der ganzen Nacht mit gleichmäßigem Abstand dazu verwendet, wenn möglich, etwa 10 Punkte aus unterschiedlichen Bändern/Strukturen zu identifizieren und deren Lage (geographische Koordinaten, Höhe) zu bestimmen. Dadurch erhält man einen Überblick über die vorkommenden Höhenmessungen und kann durch Anwendung verschiedener Filter Breiten- bzw. Elevationsabhängigkeiten untersuchen.

Im zweiten Teil wird das besonders gut sichtbare Band um etwa 21:09 Uhr genutzt, um Höhenunterschiede innerhalb einer einzelnen Struktur zu analysieren. Besonderes Interesse gilt der Frage, ob es möglich ist, den zeitlichen Verlauf so gut aufzulösen, dass die Dynamik von Schwerewellen in der Mesosphäre damit auch in vertikaler Richtung beschrieben werden kann.

# 5.2.1. Auswertung der ganzen Nacht ohne Beachtung besonderer Strukturen

Der verwendete Zeitabstand für diese erste Methode beträgt etwa 5 Minuten. Auf diese Art und Weise wurden 57 Bildpaare ausgewertet und insgesamt 533 Höhen bestimmt. Ich danke an dieser Stelle Nico Schumacher, der mich als Praktikant am IAP bei dieser Arbeit unterstützt hat. Dazu muss angemerkt werden, dass die Auswahl der vermessenen Punkte möglichst verschiedene Bänder/Bildausschnitte berücksichtigt und gerade nicht nur die Strukturen, die am hellsten und daher am besten zu vermessen sind. Da in der zweiten Nachthälfte gar keine NLC mit Elevationswinkeln von mehr als 6° vorkamen, sind die niedrigen Winkel in der Statistik stärker vertreten.

Der Anhang A.3 zeigt verschiedene Histogramme auf der Grundlage dieser Daten. Im ersten Histogramm ohne jegliche Filter fällt auf, dass die Verteilung erheblich von einer symmetrischen Verteilung abweicht. Das Maximum liegt wie erwartet bei 83 km, es gibt allerdings noch ein Nebenmaximum bei ca. 93 km und insgesamt viel mehr Detektionen größerer als kleinerer Höhen. Trotzdem werden im ersten Schritt zunächst alle Höhen unter 70 km als Falschdetektionen bezeichnet und entfernt, da in diesem Höhenbereich keine NLC auftreten können. Trotzdem wird noch einmal untersucht, wie die extrem unrealistischen Höhen von 44 km einerseits und 120 km andererseits zustandekommen. Dazu werden die mitgespeicherten Bilder betrachtet, auf denen zu sehen ist, welche Punkte in der Wolke als übereinstimmend angesehen wurden. Dabei



Abbildung 5.4.: Band, in dem die außergewöhnlich niedrigen Höhenmessungen vorkamen (grüner Kasten)

fällt auf, dass alle Höhen unter 70 km bei der Vermessung im selben Bildausschnitt auftraten, und zwar im Bereich von 15°–26° Azimuth und 0°–3° Elevation. Ab ca. 22:30 Uhr war dort ein sehr helles Band zu sehen (siehe Abb. 5.4), das zu verschiedenen Zeiten vermessen wurde sowie auch die Schleier, in die es sich später auflöste. Die Anzahl der Höhen, die man entfernt, indem man dieses Gebiet herausfiltert, beträgt 25 und ist identisch mit der Anzahl, die man herausfällt, wenn man den Höhenfilter von 70 km einsetzt. Außerdem fällt auf, dass die als identisch angesehenen Punkte bei der Vermessung nicht wirklich an derselben Stelle in der Wolke liegen, sondern in horizontaler Richtung gegeneinander verschoben sind. Eine echte Übereinstimmung lässt sich nur durch Variation der Höhe aber auch nicht erreichen. Diese Tatsache spricht dafür, dass es noch Fehler in der Zuordnung der Azimuth- und Elevationswinkel zu den Pixeln gibt, möglicherweise weil die Brechung in diesem Bildbereich eine größere Rolle spielt als durch die Formel angenommen. In anderen Bildausschnitten gibt es nämlich keine bis weniger Probleme, übereinstimmende Strukturen allein durch Höhenvariation herzustellen. Schließlich bedeutet dies, dass weder die bestimmten Höhen von 44 km noch die über 100 km als Messergebnisse gelten und somit als NLC-Höhen nicht ernst genommen werden müssen.

Die bei der Höhenfilterung nicht aussortierten 508 Werte werden nach ihrer geographischen Breite getrennt. Es wird deutlich, dass sich das Verteilungsmaximum für höhere Breiten zu größeren Höhen verschiebt. Da die Beobachtung von NLC in höheren Breiten mit einem niedrigeren Elevationswinkel korrespondiert, werden die Daten im nächsten Schritt nach Elevationswinkeln sortiert. Dabei muss eine der beiden Stationen ausgewählt werden, da die Elevationswinkel nicht exakt übereinstimmen. Das Histogramm (Abb. 5.5) wurde mit den Elevationen der KBORN-Kamera erstellt, auf die Auswertung hat die Wahl der Kamera aber keinen Einfluss. Das Ziel ist es nun, einen Winkel anzugeben, der als grobe Orientierung dienen kann, bis wie nah an den Horizont heran man genaue Höhenbestimmungen per Triangulation durchführen kann. Für den Bereich der kleinsten Elevationswinkel zwischen 0° und 3° sind die Höhen über den Bereich von 80 km bis 105 km nahezu gleichverteilt, der Mittelwert liegt bei 96,1 km. Diese Winkel sind also ungeeignet zur Triangulation. Für den Bereich von 3° bis 6° liegt der Mittelwert bei 90,4 km, bei der erwarteten Höhe um 83 km gibt es bereits eine erkennbare Häufung und für 6° bis 9° kristallisiert sich zum ersten Mal diese Höhe als deutliches Maximum heraus. Der Mittelwert für diesen Elevationsbereich beträgt 88,5 km. Als wirklich zuverlässig können dennoch nur Elevationswinkel ab 9° betrachtet werden. Für diese liegt der Mittelwert bei 83,2 km. Sie sind in der Statistik leider unterrepräsentiert, weil nur während einer vergleichsweise kurzen Zeit bei diesen Winkeln überhaupt NLC vorhanden waren.



Abbildung 5.5.: Histogramm der bestimmten Höhen für verschiedene Elevationswinkel



Abbildung 5.6.: Zur genaueren Betrachtung ausgewähltes Band

#### 5.2.2. Auswertung der Bewegung von Strukturen

Nun soll näher auf kleinere Strukturen innerhalb der Wolke eingegangen werden, in diesem Abschnitt insbesondere auf ein Band, das zwischen ca. 21:05 Uhr und 21:18 Uhr sehr gut sichtbar und aufgrund seiner großen Elevation von 8°-12° auch sehr genau zu vermessen war. Die Projektion dieses Bandes (Foto siehe Abb. 4.1) auf die Landkarte (Abb. 4.2) zeigt, dass es über Südschweden wenig nordöstlich von Göteborg lag und eine Länge von etwa 220 km hatte, davon etwa 214 km Ausdehnung in Nord-Süd- und 61 km in West-Ost-Richtung. Mit der Zeit wird dieses betrachtete Band immer diffuser und ist ab etwa 21:18 Uhr nicht mehr als solches wahrzunehmen. Abbildung 5.6 zeigt das Band zu drei verschiedenen Zeiten in etwa fünfminütigem Abstand. Man erkennt, dass die Zuggeschwindigkeit in der Mitte größer ist als an der Rändern und dass die Höhenunterschiede innerhalb des Bandes in der Größenordnung von nur bis zu einem Kilometer liegen. Dieser geringe Höhenunterschied ist ein Hinweis, dass die Höhenbestimmung für die wohl definierte Bandstruktur gut funktioniert. Die Abschnitte tendenziell größerer bzw. kleinerer Höhen ändern sich mit dem Fortschreiten des Bandes nicht. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Periode der Wellen größer ist als die hier untersuchten 10 Minuten oder dass die hellsten Teile der NLC in bestimmten Phasen von Schwerewellen auftreten. Die absolute Zuggeschwindigkeit des Bandes liegt an den Rändern bei etwa 30 m/s, in der Mitte bis zu 50 m/s. Es zieht in Richtung Nordost (ca. 68°).

Eine zweite zur Analyse ausgewählte Struktur, die vermutlich ebenfalls einer Schwere-



Abbildung 5.7.: Band und Hintergrundstruktur zur Bestimmung des Windfelds zu verschiedenen Zeiten

welle zuzuordnen ist, zieht ausschließlich in nördliche Richtung und ist in Abb. 5.7 mit 2 gekennzeichnet (das vorher betrachtete Band mit 1). Aus dem Fortschreiten dieser Struktur kann auf eine Zuggeschwindigkeit von zwischen 60 und 80 m/s geschlossen werden.

Ab ca. 21:11 Uhr tritt ein nordwestlich gelegenes Band auf, das an Helligkeit gewinnt. Es bleibt noch bis nach 22 Uhr bestehen und scheint die Bewegung des ersten Bandes in Nordost-Richtung fortzuführen.

#### 5.3. Analyse von Wellenstrukturen in NLC-Aufnahmen

Für dieses Kapitel sind nun ausschließlich horizontale Strukturen relevant, daher werden die Fotos zur Verarbeitung unter Annahme einer Höhe von 82,5 km in die Horizontebene der Kamera projiziert.

Häufig treten in leuchtenden Nachtwolken Wellenstrukturen verschiedener Längenskalen auf. Zum einen kann eine Periodizität beim Auftreten bandartiger Strukturen wie der in Kapitel 5.2.2 festgestellt werden, zum anderen treten senkrecht dazu Muster mit wesentlich kürzeren Bändern in kleineren Abständen auf (engl. "billows"). Für den ersteren Fall soll hier die Vermessung des Abstands zweier verschiedener Bänder im IOW-Bild um 21:14:42 Uhr genügen, man erhält etwa 18 km. Nicht zu verwechseln ist diese Angabe mit dem Abstand zweier Bänder in Abb. 5.6, 5.7, dort handelt es sich um dasselbe Band zu verschiedene Zeiten.

Für den zweiten Fall soll untersucht werden, ob die fischgrätenartigen Strukturen, die in der Nacht vom 10./11.07.2015 für eine genauere Analyse ausgesucht wurden, dem Brechen von Schwerewellen zugeordnet werden können. Dazu wird zunächst ein Artikel von Fritts et al. 1993 [8] herangezogen, der sich mit der Anwendung einer 3D-Simulation des Brechens von Schwerewellen in der Mesopause auf NLC-Strukturen befasst. Die wichtigsten Erkenntnisse daraus seien hier noch einmal zusammengefasst. Die Annahmen, die dieser Simulation zugrunde liegen und zu Abweichungen von tatsächlichen NLC führen können, sind eine ruhende Atmosphäre (kein Wind), eine gaußverteilte NLC-Dichte, identische und zeitlich konstante NLC-Teilchengrößen sowie die Annahme von Einfachstreuung aufgrund einer geringen optischen Schichtdicke. Die größten Strukturen, die als Bänder in Erscheinung treten, verlaufen entlang der brechenden Phase einer Welle und haben gemäß Fritts Abstände in der Größenordnung von 50 km. Senkrecht zu den Phasenflächen der Welle entstehen schmalere Streifen in kürzeren Abständen (2-4 km), die durch Wirbel und daraus resultierende vertikale Versetzungen der NLC-Dichte entstehen. Zur genaueren Betrachtung wurde hier das um 22:13:50 Uhr vom IOW aus aufgenommene Bild verwendet, genauer dessen linker mittlerer Bildteil. Es wird eine Strecke ausgewählt, die parallel zum fortschreitenden Band und damit senkrecht zu den kürzeren Streifen orientiert ist. An ihr entlang soll die Helligkeit abgelesen werden, um den Abstand benachbarter Streifen anzugeben. Dazu wird das projizierte Bild zunächst in Graustufen umgewandelt, bei der Darstellung anschließend werden diese Werte dann farblich skaliert. Der technischen Realisierbarkeit wegen sind die Achsen des projizierten Bildes in Abb. 5.8 die Pixelkoordinaten und nicht die Entfernung von der Kamera wie z.B. in 5.7. Man erkennt, dass die Streifen einen Abstand von 7-8 km haben und damit einen etwas größeren als den von Fritts et al. vorhergesagten.



Abbildung 5.8.: Analyse der Streifenstruktur: links das projizierte Bild in Graustufen farblich skaliert, die ausgewählte Strecke schwarz eingezeichnet; rechts Helligkeit entlang des Streifens

## Kapitel 6.

## **Zusammenfassung und Ausblick**

- 1. In dieser Arbeit wurden die Methoden zur Bestimmung der NLC-Höhe aus Kamerabeobachtungen und historische Ergebnisse zusammengestellt.
- 2. Eine neue Software zur semi-automatischen Bestimmung der NLC-Höhe wurde im Detail beschrieben.
- 3. Es wurden verschiedene Dual-Kamera-Beobachtungen von Kühlungsborn und Warnemünde aus untersucht und eine Nacht im Detail analysiert.

#### Ausblick

In dieser Arbeit wurden die Methoden auf einen Fall aus dem Sommer 2015 angewendet. Diese Auswertungen sollten auf weitere NLC-Ereignisse ausgedehnt werden. Die Beobachtungen leuchtender Nachtwolken mit hochauflösenden Kameras bietet sehr gute Möglichkeiten zur Analyse von Wellenstrukturen auf verschiedenen Skalen. Vor allem ermöglicht diese Methode bei sonst wolkenlosem Himmel die Erfassung eines so großen geographischen Bereichs wie keine andere Methode. Die Bewegung und Lebensdauer von Bändern kann über Stunden und mehrere hundert Kilometer hinweg lückenlos beobachtet werden.

Bei den Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Synchronisierung der Aufnahmen zweier Kameras genauer als 10 Sekunden sein sollte, da die Bewegung der Strukturen in NLC sonst zu falschen Höhen führt.

Zusammenfassung und Ausblick

## Anhang A.

## Anhang

#### A.1. Softwaremodule

Die wichtigsten verwendeten Softwaremodule der Open Source-Programmiersprache Python sind im Folgenden aufgeführt:

- numpy: Paket für numerische Berechnungen, z.B. mit Vektoren
- matplotlib: Paket für graphische Ausgaben, d.h. u.a. Darstellung der Bilder
- datetime: Paket zum Umgang mit Daten, Uhrzeiten
- ephem: Paket für Verwendung von Sternpositionen, Blickrichtungen zu Sternen, Sonnenstandsangaben usw.
- pyproj: Paket für kartographische Transformationen, z.B. Projektionen auf Landkarten, Transformation von geographischen Koordinaten im geozentrischen System, zwischen kartesischen und Kugelkoordinaten
- astropy.wcs: Paket zur Zuordnung von Pixelkoordinaten eines Bildes zu Himmelskoordinaten
- PIL (Python Image Library): Paket zur Arbeit mit Bildobjekten
- mpl\_toolkits.basemap: Paket zur kartographischen Projektion

#### A.2. Erzeugung der Bildpaare

Die Bildpaare werden nach dem folgenden Schema erzeugt: Zum Zeitstempel der IOW-Bilder werden 30 s Sekunden hinzuaddiert, dann wird eine Liste mit Paaren erzeugt, deren (neue) Zeitstempel sich um maximal 22 s unterscheiden. Diese erlaubte Abweichung muss so groß sein, da die KBORN-Kamera teils nur alle 40 s ein Bild aufgenommen hat und sonst während des betreffenden Zeitraums keine passenden Paare gefunden werden können. Als dritter Eintrag wird bei jedem Bildpaar die Abweichung von der gewünschten Zeitdifferenz ergänzt. Da insgesamt weniger KBORN-Bilder existieren als IOW-Bilder, wird anschließend von den Paaren, die dasselbe KBORN-Bild enthalten, dasjenige mit der geringsten Abweichung der Zeitdifferenz ausgesucht und die übrigen aus der Liste entfernt. Bei betragsmäßig gleicher Abweichung der Zeitdifferenz von 30 s wird das Paar mit der ursprünglichen Zeitstempeldifferenz <30 s gewählt.

#### A.3. Zu Kapitel 5.2.1: Histogramme

Zu Kapitel 5.2.1: Histogramme der bestimmten Höhen getrennt nach geographischer Breite





Alle Höhen ohne Filter





Höhen zw. 57 und 58,5° N



Höhen zw. 60 und  $62^{\circ}$  N



Höhen zw. 58,5 und  $60^{\circ}$  N



Höhen zw. 62 und 64° N



Zu Kapitel 5.2.1: Histogramme der bestimmten Höhen getrennt nach Elevationswinkeln

50 40

nzahl 30

20



Alle Höhen > 70 km

100 z/ km



Höhen zw. 0 und 3º Elev.



Höhen zw. 6 und 9° Elev.



Höhen zw. 3 und 6° Elev.



Höhen zw. 9 und 12° Elev.

## Literatur

- [1] T. W. Backhouse. "The luminous cirrus clouds of June and July". In: *Meteorol. Mag.* 20 (Sep. 1885), S. 133.
- [2] Gerd Baumgarten und David C Fritts. "Quantifying Kelvin-Helmholtz instability dynamics observed in noctilucent clouds: 1. Methods and observations". In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119.15 (2014), S. 9324–9337.
- [3] J. und Lübken F.-J. und von Cossart G. Baumgarten G. und Fiedler. "Particle properties and water content of noctilucent clouds and their interannual variation". In: *J. Geophys. Res.* 113 (2008). DOI: 10.1029/2007JD008884.
- [4] Erich Becker und Franz-Josef Lübken. "Hemisphärische Unterschiede. Über den Einfluss verschiedener physikalischer Prozesse auf die Atmosphäre in Nord und Süd: Kopplung von der Erdoberfl äche bis über 100 km Höhe". In: *Leibniz Nord*ost. Journal der Leibniz-Institute MV 20 (Apr. 2015), S. 4–5. ISSN: 1862-6335.
- [5] G. G. Bennett. "The calculation of astronomical refraction in marine navigation." In: *Journal of Navigation* 35 (1982), S. 255–259.
- [6] P. Dalin u. a. "Evidence of the formation of noctilucent clouds due to propagation of an isolated gravity wave caused by a tropospheric occluded front". In: *Geophysical Research Letters* 42 (März 2015), S. 2037–2046. DOI: 10.1002/2014GL062776.
- [7] Jens Fiedler, Gerd Baumgarten und F-J Lübken. "NLC observations during one solar cycle above ALOMAR". In: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 71.3 (2009), S. 424–433.
- [8] D. C. Fritts u. a. "Wave breaking signatures in noctilucent clouds". In: *Geophysical Research Letters* 20 (1993), S. 2039–2042. DOI: 10.1029/93GL01982.
- [9] M. Gadsden und M. J. Taylor. "Anweisungen für die photographischen Aufnahmen der leuchtenden Nachtwolken - 103 years on." In: *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 56 (Mai 1994), S. 447–459.
- [10] O. Jesse. "Auffallende Abenderscheinungen am Himmel". In: *Meteorologische Zeitschrift* 2 (Aug. 1885).
- [11] Otto Jesse. "Die Höhe der leuchtenden Nachtwolken". In: *Astronomische Nachrichten* (Feb. 1896).
- [12] J. Kiliani u. a. "Temporal and spatial characteristics of the formation of strong noctilucent clouds". In: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 104 (2013), S. 151–166.

- [13] Franz-Josef Lübken. "Leuchtende Nachtwolken und polare Mesosphärenechos". In: *Physik Journal*. 2. Ser. 6 (2003), S. 47–52.
- [14] R. C. Leslie. "Sky glows". In: Nature 32 (Juli 1885), S. 245.
- [15] Andreas Nagel. "Auswertung von all-sky-Aufnahmen zur Berechnung der Flugbahn von Meteoroiden". Bachelorarbeit. Hochschule Augsburg/ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Planetenforschung, Feb. 2011.
- [16] Norbert Auff'm Ordt. "Der Nachweis von Wellen in der Mesopause und deren mögliche Quellen". Dissertation. Universität Rostock, 1973.
- [17] Norbert Auff'm Ordt. "Erprobung optischer Systeme und Filmsorten zur Beobachtung von Erscheinungen des Dämmerungs- und des Nachthimmels". Diplomarbeit. Universität Rostock.
- P.-D. Pautet u. a. "Analysis of gravity waves structures visible in noctilucent cloud images". In: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 73 (Sep. 2011), S. 2082–2090. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.06.001.
- [19] Walter Rödel und Thomas Wagner. *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre*.
  4. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. Kap. 2, S. 85. ISBN: 978-3-642-15728-8.
- [20] James M Russell u. a. "The Aeronomy of Ice in the Mesosphere (AIM) mission: Overview and early science results". In: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 71.3 (2009), S. 289–299.
- [21] T. Sæmundsson. "Atmospheric Refraction". In: 72 (Juli 1986), S. 70.
- [22] C. Størmer. "Height and Velocity of Luminous Night Clouds Observed in Norway 1932". In: *Publications of the Oslo Observatory, vol. 1, pp.Fi-PFX* 1 (1933).
- [23] M. J. Taylor, M. A. Hapgood und D. A. R. Simmons. "The effect of atmospheric screening on the visible border of noctilucent clouds". In: *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 46 (Apr. 1984), S. 363–367.
- [24] Georg Witt. "Height, structure and displacements of noctilucent clouds". In: *TELLUS* 14 (Feb. 1962), S. 1–18.
- [25] *World Geodetic System 1984*. Technical Report TR 8350.2. Version 3. National Imagery und Mapping Agency: Department of Defense.
- [26] A. Y. Zasetsky u. a. "Ice particle growth in the polar summer mesosphere: Formation time and equilibrium size". In: *Geophysical Research Letters* 36.15 (2009). L15803, n/a–n/a. ISSN: 1944-8007. DOI: 10.1029/2009GL038727. URL: http://dx.doi.org/10.1029/2009GL038727.

#### Selbständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt und ohne fremde Hilfe verfasst habe, keine außer den von mir angegebenen Hilfsmitteln und Quellen dazu verwendet habe und die den benutzten Werken inhaltlich und wörtlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Rostock, 26.08.2016

#### Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Franz-Josef Lübken für das Angebot dieser Arbeit am IAP. Herrn Gerd Baumgarten danke ich für die Unterstützung bei allen auftretenden Fragen, die Hilfestellungen zum Programmieren in Python und die Möglichkeit, an der NLC-Kampagne im Sommer 2016 im ALOMAR-Observatorium teilzunehmen. Nico Schumacher danke ich für die Unterstützung bei der Höhenbestimmung in Kapitel 5.2.1. Außerdem möchte ich Christine Ridder und Jens Söder für das aufmerksame Korrekturlesen der Arbeit danken und schließlich noch allen, die mich in den letzten Monaten auf dem Weg zwischen Rostock und Kühlungsborn mitgenommen haben. Ich habe mich am IAP stets sehr wohl gefühlt.