



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Fachbereich: Landschaftsarchitektur, Geoinformatik, Geodäsie, Bauingenieurwesen
Fachgebiet: Geoinformatik

Masterthesis

Modellierung der meteorologischen Daten einer tachymetrischen Überwachungsmessung

April 2013

Vorgelegt von Björn Schweimler

Betreuer: Prof. Dr. -Ing. Karl Foppe
Prof. Dr. rer. nat. habil. Gerd Teschke

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2012-0690-7

Zusammenfassung

Diese Masterarbeit behandelt die Modellierung meteorologischer Daten, welche im Rahmen einer tachymetrischen Überwachungsmessung am Schiffshebewerk in Niederfinow erfasst wurden. Es werden zunächst die theoretischen Grundlagen der Streckenmessung inklusive der wirkenden Einflussfaktoren dargelegt. Darauf aufbauend wird die Modellierung der Meteorologie anhand der Kriging-Interpolation beschrieben. Das daraus entstehende Modell wird genutzt, um die Messdaten aus Niederfinow zu verarbeiten und insbesondere die gemessenen Strecken mit Hilfe der interpolierten Temperaturdaten zu verbessern. Zusätzlich dazu wird eine Simulation beschrieben, welche die Wirkungsweise des Modells und die Auswirkungen einer entsprechenden Streckenkorrektur verdeutlicht. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Anwendungsmöglichkeiten gegeben.

Abstract

This master's thesis is about modeling meteorological data, which was recorded secondarily within the scope of a project in Niederfinow. To give an overview, this thesis firstly describes the generals of distance measurement and some confounding factors. After that, the process of modeling the data by using kriging is shown theoretically. The resulting model is used to process the data from Niederfinow, especially for reducing the distance measurements. Additionally there is an simulation, pointing out the effect of this model and its influence on reducing the distance, since the data from Niederfinow is not suitable. In a conclusion this master's thesis summerizes all results and gives an overview about future extensions.

Aufgabenstellung

Thema:

Modellierung der meteorologischen Daten einer tachymetrischen Überwachungsmessung

Aufgabe:

Im Rahmen eines Projektes beim Schiffshebewerk in Niederfinow wurde das hochschuleigene Monitoring- und Analysesystem DABAMOS getestet. Der Hintergrund des Einsatzes war die Kontrolle und Absicherung des Baunetzes.

Zusätzlich zu DABAMOS war auf der Baustelle ein Sensornetzwerk zur Erfassung der meteorologischen Größen installiert. Der Verwendungszweck dieses autarken Systems ist unbekannt, da die Geodäten vor Ort ihre eigenen Temperaturdaten erheben, um die vermessungstechnischen Arbeiten zu korrigieren. Es ist zu vermuten, dass das Sensornetzwerk für andere Arbeiten im Rahmen des Neubaus genutzt wird.

Während des DABAMOS-Einsatzes sollten die erhobenen Temperaturdaten für das Monitoring verwendet werden. Ein großes Problem dabei war die Interoperabilität, also die Zusammenarbeit, beider Systeme. Das Zusammenführen der Messdaten beider Sensortypen musste manuell durchgeführt werden, da ein entsprechendes Modell fehlte.

Der Kandidat hat im Rahmen seiner Masterarbeit die Aufgabe, eine MATLAB-Bibliothek zu entwerfen und zu implementieren, mit der die meteorologischen Daten des Sensornetzes verarbeitet und modelliert werden können. Im ersten Schritt soll danach die Korrektur der durch DABAMOS bestimmten Strecken erfolgen. Im weiteren Verlauf sollen zusätzlich unterschiedliche Verwendungsmöglichkeiten des entstandenen Modells beschrieben werden.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, Björn Schweimler, die vorliegende Masterarbeit "Modellierung der meteorologischen Daten einer tachymetrischen Überwachungsmessung" selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Rostock, 20. April 2013

(Björn Schweimler)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	II
Abstract.....	II
Aufgabenstellung.....	III
Selbstständigkeitserklärung.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VII
1. Einleitung.....	1
2. Stand der Technik.....	2
2.1. Streckenmessung.....	2
a) Phasenvergleichsverfahren.....	2
b) Atmosphärische Einflussfaktoren.....	6
c) Meteorologische Sensoren & Daten.....	9
Thermometer.....	12
Aspirationspsychrometer.....	13
Barometer.....	13
2.2. Interpolation.....	14
a) Variogramm.....	15
b) Kriging.....	21
3. Modell zur Streckenkorrektur.....	25
3.1. Modellierung.....	25
3.2. Streckenkorrektur.....	29
4. Ergebnisse.....	33
4.1. Ausgangssituation in Niederfinow.....	33
4.2. Modellierung.....	35
4.3. Streckenkorrektur.....	43
4.4. Simulation.....	51
5. Zusammenfassung und Ausblick.....	60
Literaturverzeichnis.....	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messprinzip [1].....	3
Abbildung 2: Temperatur-Höhen-Profil eines warmen Sommertages [1].....	12
Abbildung 3: Gegenüberstellung Abstand - Vektor.....	16
Abbildung 4: Variogramm [15].....	18
Abbildung 5: Ablaufplan Variogramm.....	19
Abbildung 6: empirisches & theoretisches Variogramm [15].....	20
Abbildung 7: Programmablaufplan der Modellierung.....	25
Abbildung 8: Programmablaufplan Kriging.....	27
Abbildung 9: Programmablaufplan der Streckenkorrektur.....	29
Abbildung 10: Korrektur.....	31
Abbildung 11: Netzplan Niederfinow [21].....	35
Abbildung 12: Ausschnitt einer .csv-Datei der Temperatur-Sensoren.....	35
Abbildung 13: Sensorkoordinaten (oben asc-Format, unten gsi-Format).....	36
Abbildung 14: Daten eines Temperatursensors.....	37
Abbildung 15: Messgebiet.....	38
Abbildung 16: Variogramm.....	39
Abbildung 17: Variogramm ungefiltert.....	40
Abbildung 18: Ergebnis des Kriging.....	41
Abbildung 19: Krigingvarianz.....	42
Abbildung 20: Modell und Stand- & Zielpunkte.....	43
Abbildung 21: Strecken 6640.....	44
Abbildung 22: Strecken 6300-6500.....	45
Abbildung 23: Temperatur entlang der Strecke 6640-6500.....	46
Abbildung 24: Temperatur entlang der Strecke 6300-6500.....	47
Abbildung 25: Messgebiet der Simulation.....	51
Abbildung 26: Kriging-Varianz der Simulation.....	52
Abbildung 27: Verteilung der Standpunkte in der Simulation.....	53
Abbildung 28: Temperatur entlang der simulierten Strecke (x - x).....	54
Abbildung 29: Temperatur entlang der simulierten Strecke (o - o).....	55
Abbildung 30: Vergleich der Modellauflösungen.....	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Geltungsbereich Dispersionsformeln [1].....	8
Tabelle 2: herkömmliche Korrektur 6300.....	48
Tabelle 3: herkömmliche Korrektur 6300 Differenzen.....	48
Tabelle 4: herkömmliche Korrektur 6640.....	48
Tabelle 5: herkömmliche Korrektur 6640 Differenzen.....	49
Tabelle 6: Modell-Korrektur 6300.....	49
Tabelle 7: Modell-Korrektur 6300 Differenzen.....	49
Tabelle 8: Modell-Korrektur 6640.....	50
Tabelle 9: Modell-Korrektur 6640 Differenzen.....	50
Tabelle 10: Auswertung Strecke O.....	57
Tabelle 11: Auswertung Strecke X.....	57

1. Einleitung

Die Masterarbeit ist im Rahmen eines Projektes in Niederfinow am Neubau des dortigen Schiffshebewerks entstanden. Dort wurde mit Hilfe des Monitoringsystems DABAMOS im Juli und August 2012 eine tachymetrische Überwachungsmessung durchgeführt.

Neben DABAMOS wurde ein auf der Baustelle installiertes Sensorsystem genutzt, um stündlich die meteorologischen Parameter im Messgebiet zu erfassen. In der Geodäsie spielt die Bestimmung der Meteorologie eine wichtige Rolle, da die elektronische Streckenmessung auf der Basis von Trägerwellen arbeitet. Diese müssen ein optisches Medium durchqueren um bspw. zu einer Zielmarke und wieder zurück zu gelangen. Dieses Medium unterliegt unterschiedlichen Einflüssen, welche berücksichtigt werden müssen. Von daher werden bei einer geodätischen Messung Temperatur, Luftdruck sowie in Sonderfällen die Luftfeuchte bestimmt. Der momentane Standard ist, dass die Werte zum Messzeitpunkt am Stand- oder Zielpunkt erfasst und diese zur Korrektur der Streckenmessung genutzt werden.

Ein Problem in Niederfinow war die Positionierung der Sensoren. An den Standpunkten der überwachenden Tachymeter konnten keine meteorologischen Daten bestimmt werden, da die Standorte nicht vom Sensornetz abgedeckt wurden.

Die daraus resultierende Idee ist die Erzeugung eines Modells, mit dem von punkthaft gemessenen Daten auf die Verhältnisse im gesamten Messgebiet geschlossen werden können. So wird gewährleistet, dass für jeden Stand- und Zielpunkt im Areal entsprechende meteorologische Parameter vorliegen. Eine Verbesserung der Streckenmessung wird damit erheblich vereinfacht. Zusätzlich dazu wird im Rahmen der Masterarbeit untersucht, inwieweit die exakte Modellierung der meteorologischen Parameter entlang eines Messstrahls Auswirkungen auf die Streckenkorrektur hat.

Das Ziel der Masterarbeit ist die Schaffung eines theoretischen Rahmens und die Umsetzung einer Programm-Bibliothek, um möglichst viele Eingangsparameter zu erfassen und in ein einheitliches Modell zu überführen. Die Modellierung wird stellvertretend für die Messung aus Niederfinow durchgeführt. Abschließend sollen weitere Anwendungsmöglichkeiten diskutiert werden.

2. Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik beleuchtet. Dafür wird im ersten Abschnitt ein Überblick über die Streckenmessung gegeben. Dies beinhaltet auch die Beschreibung und Bestimmung der wirkenden Einflussfaktoren. Im zweiten Unterkapitel werden die mathematischen Werkzeuge zur Modellierung der Einflüsse beschrieben.

2.1. Streckenmessung

Die Streckenmessung wird auch als elektrooptische Entfernungs- oder Distanzmessung bezeichnet. Zum jetzigen Stand der Entwicklung sind drei Prinzipien gebräuchlich, nach denen die Distanz zwischen Gerät und Objekt ermittelt werden kann:

- Impulsmessverfahren
- Entfernungsmessung mit Lichtinterferenz
- Phasenvergleichsverfahren

Das letztgenannte Verfahren ist das aktuell eingesetzte und für die tachymetrische Überwachungsmessung relevante. Aus diesem Grund wird im nächsten Unterkapitel gesondert darauf eingegangen. [1]

a) Phasenvergleichsverfahren

Auf einer kontinuierlich abgestrahlten Trägerwelle wird ein sinusförmiges Messsignal aufmoduliert. Dieses ist die Maßeinheit für die Streckenmessung. Eine fest vorgegebene Modulationsfrequenz ergibt dabei die Wellenlänge: [1]

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

(1) [1]

c - Lichtgeschwindigkeit im Medium

f - Frequenz (100 - 150 MHz bei Leica [2])

Die Messwelle wird von einem Sender ausgestrahlt und durch den Reflektor zurückgeworfen. Der Empfänger nimmt das Signal wieder auf. Die Welle läuft somit die doppelte Messstrecke und erreicht das Messgerät mit einer Phasenverschiebung (Abbildung 1). [1]

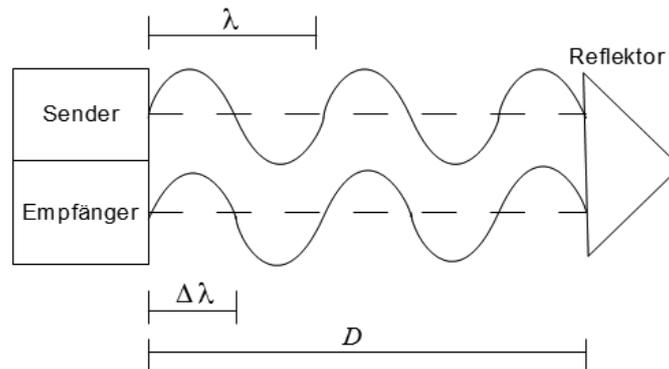


Abbildung 1: Messprinzip [1]

Die mit dem Phasenvergleichsverfahren bestimmte Strecke $2D$ ergibt sich aus dem Vielfachen N der Modulationswellenlänge λ . Zusätzlich dazu muss die Phasenverschiebung des Wellenreststücks $\Delta\lambda$ berücksichtigt werden. [1]

$$2D = N \cdot \lambda + \Delta\lambda$$

oder

$$D = \frac{N \cdot \lambda}{2} + \frac{\Delta\lambda}{2} \quad (2) [1]$$

Da nur die Wellenlänge bekannt ist, müssen die Anzahl ganzzahliger Phasendurchläufe sowie das Wellenreststück zusätzlich ermittelt werden. Für die Bestimmung von erstgenannten wird die Phasenverschiebung zwischen ausgesandter und empfangener Welle ermittelt. [1]

Ausgangssignal

$$y_A = A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3) [1]$$

mit $\omega = 2\pi f$

Empfangssignal

$$y_E = \bar{A} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{2D}) \quad (4) [1]$$

Das empfangene Signal weist eine Phasenverschiebung von φ_{2D} gegenüber dem ausgesandten auf.

$$\varphi_{2D} = N \cdot 2\pi + \Delta\varphi \quad (5) [1]$$

2π entspricht einer vollen Wellenlänge. Daraus folgt, dass sich $\Delta\lambda$ über

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda \quad (6) [1]$$

ermitteln lässt.

Die Anzahl N der ganzzahligen Phasendurchläufe ist immer noch unbekannt. Eine Möglichkeit der Bestimmung ist, die Wellenlänge so zu wählen, dass sie größer als die gemessene Distanz ist. Somit wäre die Anzahl der Wellendurchläufe Null. Der Nachteil ist, dass die Auflösung bei der Phasenmessung auf 1/5000 bis 1/10000 der verwendeten Wellenlänge beschränkt ist. Bei einer Wellenlänge von 10 Kilometer wäre eine Messung auf 1 bis 2 Meter genau, demzufolge ist eine solche Wellenlänge nur für Grobbestimmungen geeignet. Die Alternative dazu ist die Verwendung von mindestens einer weiteren Maßstabswellenlänge. Die Messung setzt sich dabei aus einer Fein- und wenigstens einer Grobmessung zusammen. Die Feinmessung erfolgt mit einer kleinen Maßstabswellenlänge λ_1 . Diese ergibt das Wellenreststück $\Delta\lambda_1$ mit einer hohen Auflösung. Dem gegenüber steht der Grobwert $\Delta\lambda_2$ aus der Messung mit einer großen Wellenlänge λ_2 . [1]

$$2D = N \cdot \lambda_1 + \Delta \lambda_1$$

und

$$2D \approx \Delta \lambda_2 \tag{7} [1]$$

Daraus ergibt sich die Bestimmung der Anzahl der Phasendurchläufe:

$$N \approx \frac{\Delta \lambda_2 - \Delta \lambda_1}{\lambda_1} \tag{8} [1]$$

Für N ist die nächstgelegene ganze Zahl zu wählen. Die Zusammenführung der Fein- und Grobmessung erfolgt mit Hilfe des Mikrocontrollers im Gerät. [1]

Der letzte Schritt der Streckenmessung ist die Bestimmung des Phasenunterschiedes $\Delta \varphi$. Zu diesem Zweck werden die drei Techniken

- analoge Phasenmessung,
- Phasenmessung mit variabler Modulationsfrequenz,
- digitale Phasenmessung

genutzt. [1]

Bei ersterer werden die ausgehenden und ankommenden Messwellen mit einem Phasenschieber gegeneinander verschoben, bis beide in Phase schwingen. Der Betrag der Verschiebung wird gemessen und stellt den Phasenunterschied dar. [1]

Die Phasenmessung mit variabler Modulationsfrequenz erfolgt mit Hilfe unterschiedlicher Modulationsfrequenzen. Diese wird solange variiert, bis die Phasenverschiebung Null ist. Das hat zur Folge, dass die Strecke ausschließlich aus ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge besteht. Aus der Formel 1 kann mit Hilfe der gemessenen Frequenz auch die Wellenlänge bestimmt werden. [1]

Die digitale Phasenbestimmung basiert auf einem Zählvorgang, durch den die Phasenverschiebung bestimmt wird. Dabei wird der zeitliche Abstand zwischen den Nulldurchgängen der Welle ermittelt. [1]

Die Genauigkeit einer Messung ergibt sich im Wesentlichen aus der relativen Genauigkeit, mit der die Frequenz erzeugt werden kann. Diese liegt bei einfachen

Nachbereichsentfernungsmessern bei $1 \cdot 10^{-5}$ bis $1 \cdot 10^{-6}$. Daraus ergibt sich die Genauigkeit der Strecke, welche aus der Maßstabswellenlänge abgeleitet wird. [1]

Die erzielten Ergebnisse der Messung sind durch einige Fehlereinflüsse gekennzeichnet. Im Speziellen wird im nächsten Unterkapitel deshalb auf die atmosphärischen Bedingungen während der Messung und die Auswirkungen auf diese eingegangen. Neben diesen wirken allerdings noch weitere Faktoren, bspw. eine ungenaue Bestimmung der Modulationsfrequenz und der Laufzeitmessung, welche an dieser Stelle nicht weiter erläutert werden.

b) Atmosphärische Einflussfaktoren

Der Einfluss der Atmosphäre wirkt sich in zweierlei Hinsicht auf die Streckenmessung aus. Zum einen beeinflusst der Brechungsindex die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle, sodass sich damit auch die Wellenlänge ändert.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{c_0}{n \cdot f} \quad (9) [1]$$

Zum anderen wirkt sich die Refraktion auf die geometrische Form der Bahnkurve aus. Im Folgenden wird die erste Auswirkung betrachtet.

Die Brechzahl n ist abhängig von der Trägerwellenlänge λ_T sowie von den meteorologischen Daten.

$$\begin{aligned} n &= n(\lambda_T) \\ n &= n(t, p, e) \end{aligned} \quad (10) [1]$$

p - Luftdruck [hPa]

t - Lufttemperatur [°C]

e - Dampfdruck [hPa]

Bei der Verwendung von monochromatischem Licht kann diese Abhängigkeit als Reihenentwicklung nach Cauchy modelliert werden. Diese Form des Lichtes ist in der Geodäsie allerdings eher selten. Es wird fast ausschließlich bei der Laser-Interferometrie

genutzt. Bei allen anderen Anwendungsmöglichkeiten verhält sich das Licht wie ein schmales Frequenzband. In diesem werden Wellen mit unterschiedlicher Wellenlänge und unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten zusammengefasst. Dabei handelt es sich um harmonische Schwingungen, welche sich überlagern. Diese ergeben eine sogenannte Wellengruppe, welche sich mit einer Gruppengeschwindigkeit fortbewegt. [1]

Die Modellierung der entsprechenden Gruppenbrechzahl n_{Gr} erfolgt ebenfalls mit einer Reihenentwicklung nach Cauchy. [1]

$$(n_{Gr}-1) \cdot 10^6 = N_{Gr} = A + \frac{3 \cdot B}{\lambda_{eff}^2} + \frac{5 \cdot C}{\lambda_{eff}^4} \quad (11) [1]$$

Die Konstanten A, B und C wurden empirisch unter Laborbedingungen ermittelt. Die beschriebene effektive Wellenlänge λ_{eff} hat neben dem Frequenzband weitere Abhängigkeiten. Vor allem die Eigenschaften des Messgerätes, im speziellen die Sende- und Empfangsoptik, der Modulator sowie die jeweiligen Filter wirken sich darauf aus. Aus diesem Grund wird die Wellenlänge experimentell von den jeweiligen Herstellern der Geräte bestimmt. Als Empfehlung für die Berechnung des Gruppenindex wurden folgende Dispersionsformeln gegeben: [1]

Edlén (1953)

$$(n_{Gr}-1) \cdot 10^6 = N_{Gr} = 287,569 + \frac{3 \cdot 1,6206}{\lambda_T^2} + \frac{5 \cdot 0,0139}{\lambda_T^4} \quad (12) [1]$$

Barrel & Sears (1939)

$$(n_{Gr}-1) \cdot 10^6 = N_{Gr} = 287,604 + \frac{3 \cdot 1,6288}{\lambda_T^2} + \frac{5 \cdot 0,0136}{\lambda_T^4} \quad (13) [1]$$

Diese sind Vorschläge der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG). Sie wurden auf der XII. Generalversammlung 1960 in Helsinki festgelegt. Die Berechnungen beziehen sich jeweils auf die Normalatmosphäre mit

- $t = 0^\circ\text{C}$

- $p = 1013,25$ hPa
- CO₂-Gehalt 0,03% und
- trockener Luft.

Zusätzlich dazu wurde im Nachhinein eine Erweiterung der Formel von Edlén vorgenommen. Dabei wurden neuere Konstanten definiert. [1]

Edlén (1966)

$$(n_{Gr}-1) \cdot 10^6 = N_{Gr} = 287,583 + 3 \cdot \frac{1,6134^2}{\lambda_T} + 5 \cdot \frac{0,0144}{\lambda_T^4} \quad (14) [1]$$

Alle beschriebenen Formeln unterscheiden sich hauptsächlich im Geltungsbereich. Eine Übersicht darüber gibt Tabelle 1.

	Jahr	Geltungsbereich
Barrel & Sears	1939	$0,43 < \lambda_T < 0,65$
Edlén	1953	$0,18 < \lambda_T < 0,65$
Edlén	1966	$0,18 < \lambda_T < 2,10$

Tabelle 1: Geltungsbereich Dispersionsformeln [1]

Um die realen Bedingungen in der Atmosphäre zu berücksichtigen, muss von der beschriebenen Normalatmosphäre interpoliert werden. Dazu wird die von Kohlrausch vereinfachte Form von Barrel & Sears genutzt. Da sich in der Fachliteratur keine Hinweise auf eine solche Vereinfachung für Edlén finden lassen, ist zu vermuten, dass eine solche nicht existiert oder zumindest nicht verbreitet ist und sich aus diesem Grund die Formel von Barrel & Sears durchgesetzt hat. [1]

$$n_L = 1 + 98,7 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{n_{Gr}-1}{1+\alpha \cdot t} \cdot p - \frac{4,1 \cdot 10^{-8}}{1+\alpha \cdot t} \cdot e \quad (15) [1]$$

Der Wert für α ergibt sich aus

$$\alpha = \frac{1}{273,16} = 0,003661 \quad (16) [1]$$

Da der Einfluss des Dampfdruckes bei Licht für $e = 15 \text{ hPa}$ nur durchschnittlich $0,6 \cdot 10^{-6}$ erreicht, wird dieses Glied häufig vernachlässigt. [1]

Die bereits beschriebenen Formel wirken sich nur bei Licht als Trägerwelle aus. Werden dagegen Mikrowellen genutzt, muss die zugehörige Brechzahl auf andere Weise berechnet werden. Allerdings wurde auch für diesen Fall von der IUGG auf der Versammlung 1960 ein Vorschlag erarbeitet. Dieser empfiehlt die Formeln von Essen/Froome:

$$(n_M - 1) \cdot 10^6 = N_M = \frac{77,64}{T} \cdot (p - e) + \frac{64,72}{T} \cdot \left(1 + \frac{5748}{T}\right) \cdot e$$

p - Luftdruck [hPa] (17) [1]

e - Dampfdruck [hPa]

T - $273 + t$

Die beschriebenen Formeln können genutzt werden, um die Korrekturparameter für Licht und Mikrowellen direkt aus der Temperatur [°C] sowie Luftdruck und Dampfdruck in [hPa] abzuleiten. Nachfolgend wird daher die Bestimmung dieser Größen erläutert.

c) Meteorologische Sensoren & Daten

Bei der Erfassung und Auswertung der meteorologischen Daten muss beachtet werden, dass auch auf diese Messungen Einflüsse wirken. Das zugrunde liegende Modell darf nicht die Annahme enthalten, dass die bestimmten Werten exakt mit der Wirklichkeit übereinstimmen. Das Modell ist lediglich eine Approximation der realen Welt. Diese kann Fehlern aufweisen, welche berücksichtigt werden müssen. Zum einen handelt es sich dabei um ungenaue Messungen am Stand- und Zielpunkt. Zum anderen ist die Bestimmung an den Punkten nicht repräsentativ für die realen Bedingungen entlang der gemessenen Strecke. Die möglichen Fehler haben unterschiedliche Auswirkungen auf Licht und Mikrowellen. Der Haupteinfluss bei Licht als Trägerwelle ist die Temperatur. Im Gegensatz dazu ist bei Mikrowellen eine

möglichst genaue Bestimmung des Dampfdrucks wichtig. Der Einfluss von e wirkt sich hier 100mal stärker aus, als das bei Lichtwellen der Fall ist. [1] [3]

Der ersten Fehlerursache wird durch eine sorgfältige Messung sowie ausreichend genauen Sensoren entgegen gewirkt. Mit den entsprechenden Geräten können für Temperaturen Genauigkeiten von ca. $\pm 0,2^\circ C$ und bei der Druckbestimmung Genauigkeiten von ca. $\pm 0,2 hPa$ erreicht werden. Diese skizzierten Messabweichungen wirken sich auf die Streckenmessung mit Licht s_{D_L} und Mikrowellen s_{D_M} folgendermaßen aus: [1]

$$\begin{aligned} s_{D_L} &= \pm 0,2 * 10^{-6} * D \\ s_{D_M} &= \pm 1,6 * 10^{-6} * D \end{aligned} \tag{18} [1]$$

Die elektrooptisch gemessene Strecke ist in diesem Szenario um ca. eine Größenordnung genauer. Die Streckenmessung mit Mikrowellen hat auch aus diesem Grund heute nur noch eine geringe praktische Bedeutung. [1]

Um der zweiten Fehlerursache entgegen zu wirken und die wahren atmosphärischen Verhältnisse entlang der Bahnkurve abzuleiten, ist die Bedingung zu stellen, dass der berechnete Brechungsindex mit dem Integralmittel übereinstimmt. Dieser muss demnach mit einem mittleren, repräsentativen Brechungsindex identisch sein. Diese Forderung ist allerdings nur schwer zu erfüllen, da Faktoren wie Geländeprofil und atmosphärische Schichtung eine, zum Teil erhebliche, Abweichung hervorrufen.

Die Bestimmung und der Einfluss des Drucks sind relativ unkompliziert. Die Messwerte hängen stark von der Höhe des Punktes ab. Andere Einflüsse wirken sich nur gering auf den Druck aus und können daher vernachlässigt werden. Zur Bestimmung des Drucks wird die Jordansche Formel genutzt. Diese berechnet aus dem Druck am Streckenendpunkt den mittleren Druck entlang des Messstrahls. [1]

$$\bar{p} = p_1 * (1 - 1,7 * 10^{-2} * \frac{\Delta h}{T} + 1,9 * 10^{-4} * \frac{\Delta h^2}{T^2})$$

\bar{p} - mittlerer Druck entlang des Messstrahls (19) [1]

p_1 - gemessener Druck im Punkt P_1

$\Delta h = H_2 - H_1$ - Höhenunterschied in Meter

T – absolute Temperatur

Die Temperatur ist im Gegensatz zum Druck stärker vom Verlauf des Messstrahls beeinflusst. Gerade bei längeren Strecken mit einer ungünstigen Topographie können die resultierenden Schwankungen sehr stark sein und bei einigen °C liegen. Auch die unterschiedlichen Luftschichten, welche durchlaufen werden, spielen eine Rolle.

In der so genannten bodennahen Luftschicht sind die Temperaturen typischerweise am höchsten. Allerdings gibt es auch hier Unterschiede, je nach Beschaffenheit des Untergrunds. Bspw. ist an einem sonnigen Tag die Temperatur über Asphalt sehr viel höher als über anderen Materialien oder Böden. Unmittelbar an die bodennahe Luftzone grenzt die labile Unterschicht. Diese ist gekennzeichnet durch eine mit zunehmender Höhe abnehmende Temperatur. Sie stellt den Übergang zur adiabatischen Zwischenschicht dar. Die Temperaturunterschiede von einer Schicht zur nächsten können mehrere °C betragen und damit eine erhebliche Auswirkung auf die Streckenmessung haben. [1]

Einen Überblick darüber gibt Abbildung 2. In dieser werden die Zusammenhänge zwischen Temperatur und Höhe deutlich. Auffällig ist dabei die große Temperaturspanne in der bodennahen Luftschicht. Diese umfasst in dem Beispiel 15°C. Solche Schwankungen haben erhebliche Auswirkungen auf die Streckenmessung. Daher müssen sie möglichst genau erfasst und berücksichtigt werden. [1]

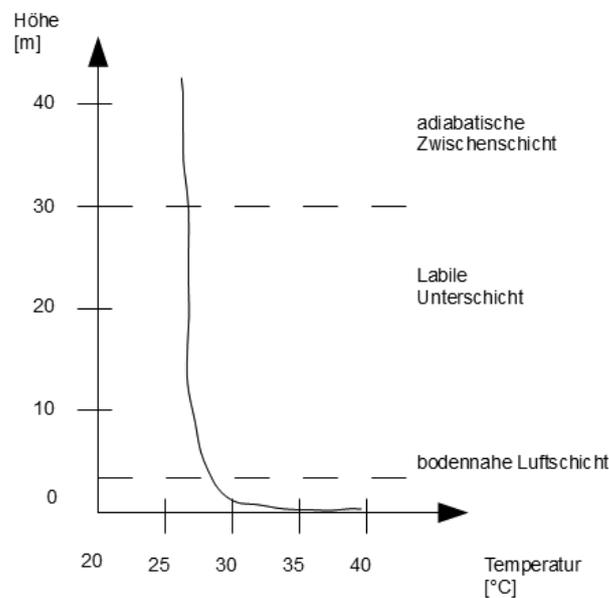


Abbildung 2: Temperatur-Höhen-Profil eines warmen Sommertages [1]

Insgesamt ist der Einfluss der Atmosphäre auf die Streckenmessung größer als die reine Messungsgenauigkeit. Aus diesem Grund müssen die genannten Faktoren berücksichtigt und die ermittelten Strecken mit den beschriebenen Werkzeugen korrigiert werden. Gerade für die Temperatur ist aus den genannten Gründen eine möglichst exakte Modellierung entlang des Messstrahls von Vorteil. Mit Hilfe eines entsprechenden Modells können die Effekte detektiert und korrigiert werden. Im Rahmen der Masterarbeit wird aus diesem Grund untersucht, inwieweit eine solche Modellierung Auswirkung auf die Genauigkeit der Streckenkorrektur hat. Eine Bestimmung der beschriebenen Größen mit den jeweiligen Sensoren wird nachfolgend erläutert. [1]

Thermometer

Das Thermometer ist ein Instrument zur Bestimmung der Temperatur. Die Messung kann auf sehr unterschiedlichen Prinzipien beruhen. Die Ermittlung kann mechanisch, elektrisch, optisch oder auch magnetisch erfolgen, denn diese physikalischen Eigenschaften können alle mit der Temperatur verknüpft werden. [4]

Die heutigen digitalen Thermometer basieren häufig auf dem elektrischen Prinzip. Dabei wird

ein Widerstand verbaut, dessen Eigenschaften sich mit der Temperatur verändert. Diese typische Kennlinie wird zuvor im Labor bestimmt und in einer Lookup-Table hinterlegt. Aus der Widerstandsänderung kann so die Temperatur ermittelt und in digitaler Form gespeichert werden. [5]

Aspirationspsychrometer

Das Aspirationspsychrometer nach Assmann dient der Messung der Lufttemperatur und des Partialdruck des Wasserdampfes . Es besteht aus zwei parallel angeordneten Thermometern, von denen eins als sogenanntes Feuchtthermometer fungiert. Dessen Gefäß ist von einem Befeuchtungsstrumpf umhüllt, welche für die Messung befeuchtet wird. Das Gefäß des zweiten Thermometers ist unverhüllt. Ein Aspirator saugt Luft an beiden Sensoren vorbei. Je trockener diese ist, desto schneller verdunstet die Flüssigkeit am Feuchtthermometer. Dadurch wird Verdunstungskälte erzeugt, welche in Differenz zur gemessenen Temperatur des anderen Thermometers steht. Mit Hilfe von Psychrometertafeln lassen sich aus dem Unterschied verschiedene Parameter, bspw. die Luftfeuchtigkeit, ermitteln. Die Messwerte können digital durch entsprechende Thermometer erfasst und die Feuchtigkeit durch einen Microcontroller und eine hinterlegte Lookup-Table bestimmt werden. Das psychrometische Messprinzip ist sehr exakt, entsprechende Sensoren erreichen eine Genauigkeit von +/- 0,5 %. [1] [6] [7]

Barometer

Das Barometer ist ein Instrument zur Bestimmung des Luftdrucks. Bei einem einfachen Quecksilberbarometer wird der Druck mit Hilfe einer gefüllten senkrechten Glasröhre bestimmt. Diese enthält sowohl Quecksilber als auch einen luftleeren Raum am oberen Ende der Röhre. Die Glasröhre ist unten offen und erlaubt es dem Druck so, das Gewicht der Quecksilbersäule auszugleichen. Diese Säule steigt oder fällt um wenige Zentimeter, je nach der Größe des Drucks. Die Länge der Säule ist demnach ein Indikator für den Luftdruck, allerdings müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden. Zum einen wirkt sich die Temperatur auf das Quecksilber und auch auf die Glasröhre aus. Zum anderen muss die geografische Breite berücksichtigt werden. [8]

Die digitalen Barometer registrieren die durch den Druck hervorgerufene Biegung einer Membran. Diese wird mit Hilfe eines Dehnungsmessstreifens (DMS) detektiert. Die

Längenänderungen des DMS kann über Widerstandsänderungen ermittelt werden. Auch hier wird die entsprechende Kennlinie empirisch ermittelt. Die Werte können in digitaler Form gespeichert oder übertragen werden. [9]

2.2. Interpolation

Für die Modellierung der meteorologischen Parameter entlang des Messstrahls ist es notwendig aus einzelnen Messwerten einen Temperaturverlauf zu interpolieren. Bei einer Interpolation wird eine mathematische Funktion $f(x)$ gesucht, welche gegebene Datenpunkte miteinander verbindet. Durch diese mathematische Beziehung wird es möglich, Zwischenwerte zu berechnen, für die keine Daten erhoben wurden. [10]

Die räumliche Interpolation weitet diese Technik auf die Untersuchung von Werteoberflächen aus. Aus einer endlichen Anzahl von beprobten Orten wird mit Hilfe des Feld-Konzeptes die Funktion $f(x, y)$ ermittelt. Dadurch ist es möglich, die stetige Veränderung der Werte auf einer Fläche nachzubilden. Die Grundlage dafür bilden numerische oder statistische Modelle. [11]

Die deterministischen Verfahren arbeiten mit bestimmten mathematischen Formeln und den in der Nachbarschaft liegenden Proben, um einer Position einen bestimmten Wert zuzuordnen. Typische Verfahren sind das Inverse Distance Weighting (IDW) sowie der Natural Neighbor. [12]

Die geostatistischen Methoden basieren auf den statistischen Modellen, welche häufig die Autokorrelation umfassen. Das Ergebnis ist daher nicht nur eine anhand der Proben angenommene Fläche, sondern zusätzlich eine Annahme über die Gewissheit der Vorhersagen. Ein Beispiel dafür ist das Kriging. [12]

Nachfolgend ein Überblick über die drei gebräuchlichsten räumlichen Interpolationsmethoden:

IDW

Diesem Interpolationsverfahren liegt die Annahme zugrunde, dass die endliche Anzahl von beprobten Orten in Abhängigkeit von der Distanz zueinander eine gewisse Ähnlichkeit bezüglich ihrer Werte aufweist. Das Verfahren arbeitet mit einem gewichteten Mittel, welches

den Wert eines unbeprobten Ortes schätzt, indem der Abstand zwischen unbekanntem und gemessenem Punkt berücksichtigt wird. [13]

Natural Neighbor

Bei der Interpolationsmethode Natürlicher Nachbar wird nach der nächstgelegene Teilmenge eines Punktes gesucht. Proportional zu deren Fläche wird dieser Menge eine Gewichtung zugewiesen. Basierend darauf wird für den gesuchten Punkt der Wert ermittelt. Die Methode wird auch Voronoi- oder Sibson-Interpolation genannt. [14]

Kriging

Das Kriging-Verfahren basiert auf der Hypothese, dass nicht nur die Entfernung sondern auch die Richtung zwischen Referenzpunkten eine Abhängigkeit widerspiegelt. Durch diesen Vektor lassen sich Variationen auf der Oberfläche erklären, welchen anderen Modellen entgehen würden. Da es sich um ein statistisches Verfahren handelt, sind im Ergebnis zusätzlich Informationen zur Güte des Modells enthalten. Kriging ist eine verbreitete Interpolation zur Modellierung von meteorologischen Parametern, daher wird es für die Lösung der Aufgabenstellung dieser Masterarbeit verwendet und in den folgenden Abschnitten Schritt für Schritt erläutert.

a) Variogramm

Die Grundlage des Krigings bildet das Variogramm. Dieses enthält die Annahme über die räumlichen Zusammenhänge von punkthaft gemessenen Daten. Es wird verwendet, um eine räumliche Interpolation dieser Daten zu erzeugen. Zu diesem Zweck wird ein geostatistisches Modell erzeugt, in dem die bestimmten raumbezogenen Daten $z(u_n)$ als Realisierungen von Zufallsdaten $Z(u_n)$ betrachtet werden. Zusätzlich dazu werden auch die unbeprobten Orte als Zufallsvariablen bezeichnet. Die Menge aller Variablen ist der stochastischer Prozess oder auch die Zufallsfunktion Z . [15]

$z(u_1), \dots, z(u_n)$ - Werte der Beobachtungsvariable

u_1, \dots, u_n - beprobte Orte (20) [15]

$Z(u_1), \dots, Z(u_n)$ - Realisierungen der Zufallsvariablen

Die Annahme innerhalb des Modells ist, dass der räumliche Zusammenhang nicht von der geometrischen Lage der Proben, sondern vielmehr von Distanz und Richtung, also einem entsprechenden Vektor, abhängt.

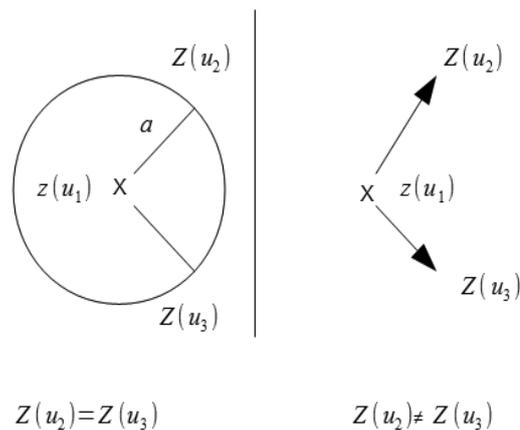


Abbildung 3: Gegenüberstellung Abstand - Vektor

Abbildung 3 zeigt den resultierenden Unterschied. Auf der linken Seite der Grafik nehmen alle Realisierungen mit dem gleichen Abstand, also im Umkreis mit dem Radius a , den gleichen Wert an. Auf der rechten Seite ist der räumliche Zusammenhang über einen Vektor dargestellt. Auch wenn der geometrische Abstand beider Punkte identisch ist, stimmen die Realisierungen der Zufallsvariable nicht überein, da zusätzlich die Richtung berücksichtigt wird.

Diese Behauptung wird als Eigenschaft des Modells definiert. Ein entsprechender Prozess wird als intrinsisch stationär bezeichnet, wenn er folgende zwei Voraussetzungen erfüllt: [15]

- der Erwartungswert aller Zufallsvariablen ist gleich

$$E[Z(u)] = \mu \quad (21) [15]$$

- der räumliche Zusammenhang hängt nicht von der absoluten Lage sondern von einem Abstandsvektor ab

$$\begin{aligned} \text{Zus}[Z(u), Z(v)] &= \gamma(h) \\ h &= v - u \quad \text{- Abstandsvektor} \end{aligned} \quad (22) [15]$$

u , v in Untersuchungsgebiet

Das Variogramm ist ein Kennwert des beschriebenen Prozesses, welcher ein Maß für den räumlichen Zusammenhang zweier ortsbezogener Zufallsvariablen ist. Zu diesen Zweck wird die Varianz der Differenz beider Datensätze genutzt. Die Variablen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Lage um den Abstandsvektor.

$$\gamma(h) = \text{Var}[Z(u) - Z(u+h)] \quad (23) [15]$$

Die Varianz ist ein Maß für die mittlere Streuung der Werte. Als Faustregeln gilt: streuen die Werte der Differenz stark, so ist die Varianz groß. Das bedeutet, dass die Variablen im Mittel sehr unterschiedliche Werte annehmen. Der Wert im Variogramm ist dementsprechend klein, d.h. es liegt ein geringer räumlicher Zusammenhang vor. Im Gegensatz dazu bedeutet ein geringeres Streuen der Differenz, dass die Realisierung im Mittel ähnliche Werte annehmen, was in einem großen räumlichen Zusammenhang und damit auch großen Variogrammwerten resultiert. [15]

Neben dem Variogramm kann der Zusammenhang über die sogenannte räumliche Autokorrelation beschrieben werden. Diese ist eine Erweiterung des Autokorrelations-Konzeptes für Zeitreihen in den zweidimensionalen Raum. [15]

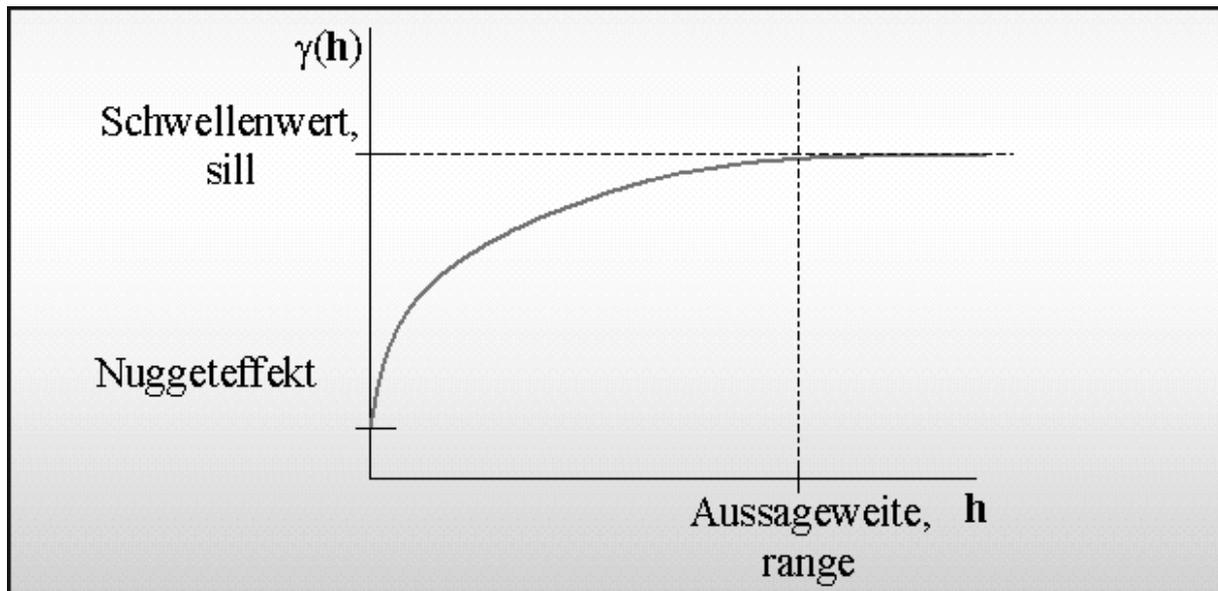


Abbildung 4: Variogramm [15]

Das Variogramm (Abbildung 4) wird häufig als monoton wachsende Funktion dargestellt. Wenn der Zusammenhang zwischen zwei Variablen abnimmt, nimmt die Varianz der Differenz zu. Der Abstand, bei dem der Schwellwert (sill) asymptotisch wird, heißt Aussageweite (range). Haben zwei Zufallsvariablen einen größeren Abstand als die Aussageweite, so sind sie unabhängig von einander. Ist das Variogramm auf der y-Achse verschoben, wird das Nuggeteffekt genannt. Dieser resultiert hauptsächlich aus Messfehlern und räumlichen Schwankungen. Letztgenannte treten auf, wenn die Entfernungen kleiner als das Abtastintervall sind. Da die Funktion $\gamma(h)$ abhängig von dem Abstandsvektor h ist, variiert sie mit dem Abstand und der Richtung der Variablen. Wenn es unabhängig von der Richtung ist, wird das Variogramm als isotop bezeichnet. [15] [16]

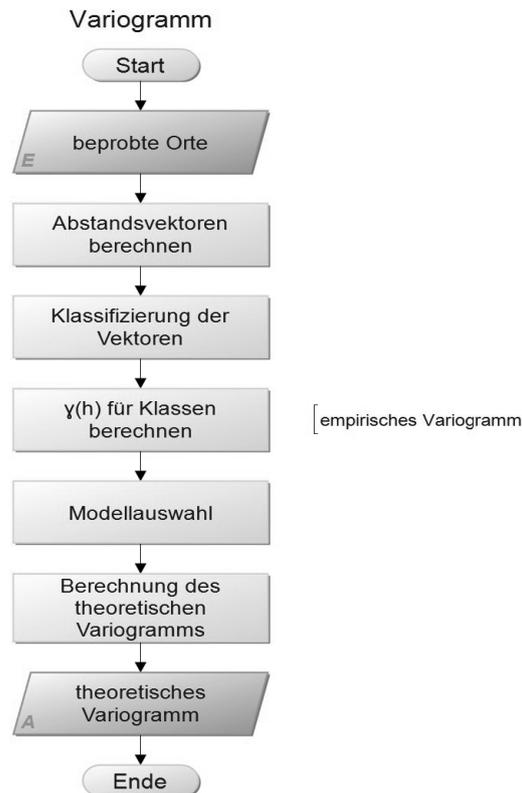


Abbildung 5: Ablaufplan Variogramm

Die Schätzung des Variogramms erfolgt in mehreren Schritten (Abbildung 5). Als erstes muss das sogenannte empirische Variogramm, welches eine Funktion des Abstandsvektors ist, bestimmt werden. Daraus folgt, dass für jeden Abstand h ein Wert des Variogramms geschätzt werden muss. Zu diesem Zweck werden die Abstandsvektoren der beobachteten Variablen berücksichtigt, um das Variogramm für die beprobten Standorte zu erhalten. Dazu wird der klassische Variogrammschätzer genutzt, welcher in der Praxis häufig in abgeschwächter Form eingesetzt wird. Demnach wird eine Klassifizierung der Daten durchgeführt, wonach diese in Entfernungs- und Richtungsklassen eingeteilt werden. Die eigentliche Schätzung erfolgt dann für diese Klassen. Basierend darauf kann die Schätzung für die Abstandsvektoren ohne bekannte Messwerte erfolgen. Dazu wird dementsprechend das theoretische Variogramm modelliert. Dieses ist im Wesentlichen eine Schätzung der Grundgesamtheit des Variogramms. [15]

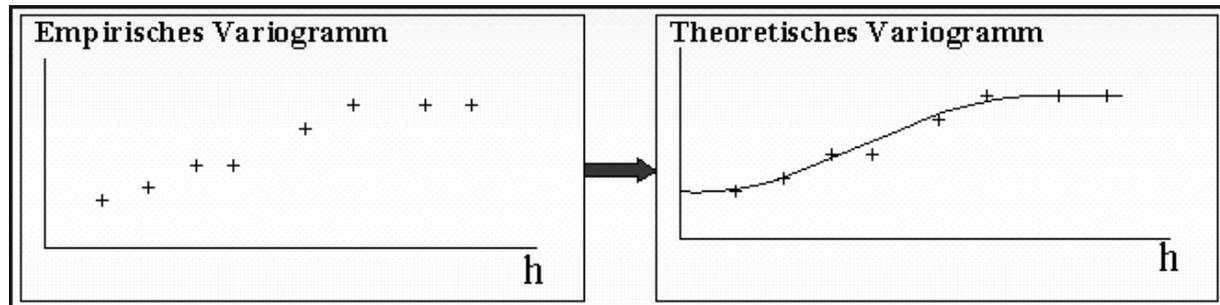


Abbildung 6: empirisches & theoretisches Variogramm [15]

Die Annahme ist, dass durch den räumlichen Zusammenhang des empirischen Variogramms schon der grobe Verlauf des theoretischen bekannt ist. Demzufolge wird eine angepasste Funktion durch das empirische Variogramm gelegt, welche den Verlauf möglichst gut widerspiegelt (Abbildung 6). Die Bedingung für die Funktion ist, dass diese konditional bedingt negativ semidefinit ist. Diese Funktionen sind schwierig nachzuweisen, weshalb häufig vorgefertigte einfache Funktionen mit vorhandenem Nachweis genutzt werden, für die nachfolgend eine Auswahl aufgelistet wird: [15]

- Sphärisches Modell
- Exponentielles Modell
- Gaussches Modell
- Lineares Modell

Das gewählte Modell beeinflusst die Werte der unbeprobten Orte. Vor allem die Form der Kurve am Koordinatenursprung, also bei Punkten mit einem geringen statistischen Abstand, hat große Auswirkungen. Je steiler die Kurve dort ist, desto größer ist der Einfluss der nächsten Nachbarn. [16]

Nach der Durchführung dieser Schritte liegt das Variogramm für den stochastischen Prozess vor.

b) Kriging

Das Kriging ist ein geostatistisches Verfahren, welches für die räumliche Interpolation genutzt wird. Die Grundlage hierfür bildet das schon beschriebene theoretische Variogramm. Das Verfahren schätzt die räumliche Verteilung von Daten anhand der Zusammenhänge, welche in dem Variogramm enthalten sind. [17]

Kriging ist nach dem südafrikanischen Bergbauingenieur D. G. Krige benannt. Das Verfahren wurde Mitte des 20. Jahrhunderts in Frankreich von G. Matheron entwickelt. Das ursprüngliche Anwendungsgebiet war der Bergbau. Parallel zu Matheron hat L. S. Gandin das gleiche Verfahren in der Sowjetunion entwickelt. Allerdings wurde es dort genutzt, um meteorologische Daten zu interpolieren. [17]

Kriging ist eine lineares Schätzverfahren, welches eine erwartungstreue Schätzung an unbeprobten Orten ermöglicht. Ein besonderes Merkmal ist die Effizienz, mit der die Werte geschätzt werden. [17]

Beim Kriging wird in verschiedene Methoden unterschieden, dazu gehören Simple, Ordinary und Universal. Erstgenannte Methode geht davon aus, dass der konstante Mittelwert der Messwerte bekannt ist. Dies ist häufig nicht der Fall, weswegen diese Methode relativ selten angewendet wird. Beim Ordinary Kriging wird dagegen von der Annahme ausgegangen, dass der Mittelwert unbekannt ist. Als Erweiterung dazu wird beim Universal Kriging ein vorrangiger Trend in den Daten vermutet. Dieser kann bspw. als Polynom modelliert und dann bei der Modellierung berücksichtigt werden. Nachfolgend wird das Ordinary Kriging näher erläutert, da es auch im Abschnitt 4.2 für die Modellierung der Daten verwendet wird. [16]

Nichtstatistische Interpolationsverfahren nutzen ein gewichtetes Mittel der benachbarten gemessenen Werte, um den Betrag einer Zufallsvariable an einem unbeprobten Ort zu ermitteln. Dies ist auch beim Kriging der Fall. Allerdings sind die Gewichte im zugrunde liegenden geostatistischen Modell optimiert. Das bedeutet, dass der Schätzer keinen systematischen Fehler macht und so im Mittel den wahren Wert schätzt. [17]

Der Krige-Schätzer $z^*(u_0)$ ist wie folgt definiert:

$$z^*(u_0) := \sum v_i z(u_i) \quad (24) [17]$$

Zur Bestimmung der Gewichte des Schätzers muss eine Extremwertaufgabe gelöst werden. Das entsprechende Ergebnis sind die Gewichte für den Punkt u_0 . [17]

Die Extremwertaufgabe lautet:

$$E[F(u_0)] = 0 \quad (25) [17]$$

mit der Nebenbedingung:

$$Var[F(u_0)] = \min\{F(u_0), v_1, \dots, v_n \text{ reelle Zahlen}\} \quad (26) [17]$$

Die Extremwertaufgabe fordert, dass der entsprechende Schätzfehler $F(u_0)$ im Mittel gleich Null ist. Die Nebenbedingung setzt voraus, dass die Varianz des Schätzfehlers minimal ist. Der Term $Var[F(u_0)]$ wird als Kriging-Varianz bezeichnet. [17]

Aufgrund der Stationarität des Prozesses und der Linearität des Erwartungswertes kann die Nebenbedingung folgendermaßen vereinfacht werden. [17]

$$\begin{aligned} 0 &= E[F(u_0)] = E[Z(u_0) - \sum v_i Z(u_i)] \\ 0 &= E[Z(u_0)] - (\sum v_i E[Z(u_i)]) = E[Z(u_0)](1 - \sum v_i) \end{aligned} \quad (27) [17]$$

Daraus folgt, dass die Summe der Gewichte eins ergeben muss:

$$1 = \sum v_i \quad (28) [17]$$

Für die Varianz des Schätzfehlers gilt:

$$Var[F(u_0)] = 2 \sum v_i \gamma(u_i - u_0) - \sum \sum v_i v_j \gamma(u_i - u_j) - \gamma(0) \quad (29) [17]$$

Die Lösung erfolgt mit der Methode der Lagrange-Multiplikatoren. Dabei wird ein lineares

Gleichungssystem aufgestellt. Dessen eindeutige Lösung sind die Gewichte des Schätzers. Diese sind für jeden zu schätzenden Wert neu zu berechnen. [17]

$$\sum v_j \gamma(u_i - u_j) + v = \gamma(u_i - u_0) \quad \text{für } i = 1, \dots, n$$

$$1 = \sum v_i$$
(30) [17]

Bei der Variable v handelt es sich um eine Hilfsvariable, welche aus der Methode der Lagrange-Multiplikatoren stammt. [17]

In der Matrix-Schreibweise ergibt sich für obiges Gleichungssystem folgendes:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1n} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma_{n1} & \dots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_1 \\ \dots \\ v_n \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \dots \\ \gamma_{n0} \\ 1 \end{bmatrix}$$
(31) [17]

$$C \cdot v = D$$

Da γ definit und die Matrix C somit invertierbar ist, ist die Lösung $v = C^{-1} D$. Das Ergebnis sind die Gewichte des Krige-Schätzers für den Ort u_0 . Der Schätzwert ist demnach das schon erwähnte Resultat aus: [17]

$$z^*(u_0) := \sum v_i z(u_i)$$
(32) [17]

Die Matrix D enthält die Variogrammwerte zwischen dem zu schätzenden Wert und den für die Schätzung berücksichtigten Nachbarwerten. Die Matrix drückt damit den Zusammenhang zwischen beiden aus. Theoretisch können die Krige-Gewichte ausschließlich mit Hilfe dieser Variogrammwerte berechnet werden. Dabei würde ein Interpolationsverfahren ähnlich dem Inverse-Distance-Verfahren entstehen. Da beim Kriging die Gewichte allerdings an das reale Problem angepasst werden, wird der geometrischen Abstand der Punkte durch einen sogenannten statistischen Abstand, auch als Ähnlichkeit bezeichnet, ersetzt. [17]

Die Matrix C fasst die Variogrammwerte zwischen allen Nachbarwerten des zu schätzenden Wertes zusammen. Zwei nah beieinander liegende Nachbarwerte haben einen kleinen

Variogrammwert, ist die Distanz zwischen beiden groß, so ist auch der Variogrammwert groß. [17]

$$\text{Gewichte}(v) = \text{Clusterung}(C^{-1}) * \text{Abstand}(D)$$

Die Multiplikation der Inversen von C mit D erfasst die Cluster in den Nachbarpunkten. Die Gewichte von statistisch dicht beieinander liegenden Punkten, welche redundante Informationen liefern, werden gesenkt und auf andere Nachbarwerte verteilt. Daraus folgt, dass Kriging sowohl den Abstand vom Nachbarpunkt zum zu schätzenden Punkt als auch die Clusterung berücksichtigt. [17]

Das Variogramm hat einen großen Einfluss auf das Schätzergebnis und damit auch auf das Interpolationsergebnis. Die Form des Variogramms hat dabei erhebliche Auswirkungen auf die Interpolation. Ist der einzige Unterschied zwischen zwei Variogrammen der Schwellwert, so ist das Schätzergebnis bei beiden identisch. Lediglich die Kriging-Varianz steigt mit zunehmendem Schwellenwert. Unterscheiden sich zwei Variogramme durch ihre Aussageweite, so sind sowohl das Schätzergebnis als auch die Kriging-Varianz verschieden. Eine kleine Aussageweite bedeutet, dass die Werte nahezu unabhängig voneinander sind. Daraus resultiert ein Krige-Schätzer, der sich dem arithmetischen Mittelwert nähert. Bei einer großen Aussageweite wird die Kriging-Varianz kleiner und die Werte liegen im statistischen Abstand näher beieinander. Auch die Form der Funktion hat einen Einfluss. Variogramme mit parabolischem Verhalten am Ursprung modellieren räumliche Zusammenhänge mit einer sehr starken Ausprägung in kleinen Bereichen. Nächstgelegene Werte erhalten bei einer Interpolation somit höhere Gewichte als es bei einem linearen Verhalten am Ursprung der Fall ist. [17]

Die Kriging-Varianz ist die Varianz des Schätzfehlers, welche unabhängig von den gemessenen Werten ist. Aus diesem Grund ist sie kein absolutes Maß für die Genauigkeit der Schätzung an einem Ort. Allerdings skizziert sie die Konfiguration des Messnetzes. Sie deckt dabei auf, in welchen Bereichen des Messgebietes ein Informationsmangel vorliegt. Dabei erhalten die Interpolationorte mit dem größten Abstand zu benachbarten Messpunkten die höchsten Werte der Kriging-Varianz. Neue Messpunkten sollten dementsprechend in diesen Maxima angelegt werden. [17]

3. Modell zur Streckenkorrektur

In diesem Kapitel wird die konkrete Umsetzung des Modells zur Streckenkorrektur in MATLAB beschrieben. Zu diesem Zweck wird anfangs die Modellierung der meteorologischen Daten mit Hilfe der räumlichen Interpolation beschrieben. Darauf aufbauend wird die Durchführung der eigentlichen Streckenkorrektur erläutert.

3.1. Modellierung

In diesem Unterkapitel werden Einzelheiten und Abläufe innerhalb der zu erarbeitenden MATLAB-Bibliothek erläutert. Diese soll alle benötigten Funktionen zur Verarbeitung und Modellierung von meteorologischen Daten bündeln. Im Groben können die Funktionen in Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe, also das EVA-Prinzip, untergliedert werden.



Abbildung 7: Programmablaufplan der Modellierung

Die Abbildung 7 zeigt den Ablauf für die Verarbeitung von meteorologischen Daten. Diese liegen häufig im .csv-Format vor. Das äußere Erscheinungsbild dieses Formats zeichnet sich dadurch aus, dass die Messwerte in Spalten, getrennt durch ein beliebiges Zeichen, angeordnet sind. In der ersten Spalte ist häufig der Zeitstempel zu finden, während diesem ein oder mehrere spezifische Messwerte zugeordnet sind. In der ersten Zeile können sogenannte Header definiert werden, welche Bezeichnungen für die einzelnen Spalten entsprechen.

Diese Daten müssen in MATLAB eingeladen werden. Die vorgefertigte Funktion `csvread` hat den Nachteil, dass kein beliebiges Trennzeichen zwischen den Spalten gewählt werden kann. Bei der Nutzung dieser Funktion können nur .csv-Dateien mit Komma als Trennzeichen verarbeitet werden. Das ist nicht sehr praktikabel, da bspw. auch das Semikolon als sogenannter Delimiter gebräuchlich ist. Aus diesem Grund wird für diese Bibliothek eine neue Funktion entwickelt. Diese kann mit jedem beliebigen Trennzeichen und auch einer beliebigen Anzahl von Headern umgehen.

Neben den eigentlichen Daten müssen die Koordinaten der Sensoren in das MATLAB-Programm geladen werden. Diese werden benötigt, um die räumliche Interpolation durchzuführen. Eine entsprechende Funktion kann Dateien im .gsi- sowie im .asc-Format verarbeiten. Im Verlauf der Weiterentwicklung der Bibliothek ist es denkbar, weitere Formate zu berücksichtigen.

Nach diesem Schritt ist das Einladen beendet. Alle benötigten Daten liegen in MATLAB-kompatiblen Formaten vor und können dementsprechend weiter verarbeitet werden. Aufgrund dessen, dass es sich um Daten von Sensoren handelt, sind diese mit Fehler, also mit einem gewissen Rauschen behaftet. Aus diesem Grund empfiehlt es sich Filter, wie ein gleitendes Mittel oder einen Gaußfilter, anzuwenden, bevor weitere Verarbeitungsschritte erfolgen.

Nachdem die Informationen aufbereitet wurden, können die gefilterten Sensordaten mit den eingeladenen Koordinaten verknüpft werden. Die Zeitreihen der Sensoren erhalten damit den benötigten Raumbezug. Diese Beziehung ist Voraussetzung für die räumliche Modellierung der Daten.

räumliche Interpolation - Kriging

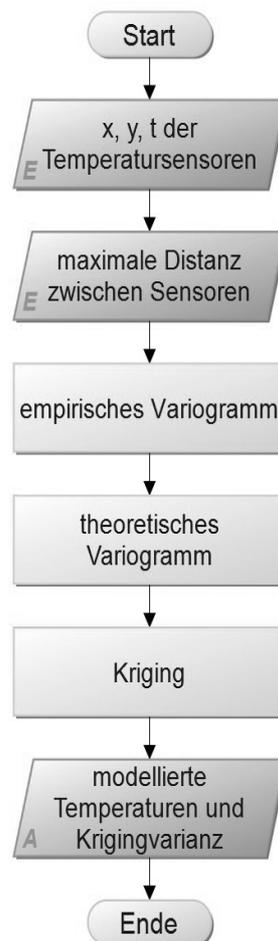


Abbildung 8: Programmablaufplan Kriging

Die theoretischen Grundlagen für die räumlich Interpolation können Abschnitt 2.2 entnommen werden. Der Programmablaufplan (Abbildung 8) beschreibt die einzelnen Schritte, welche durchlaufen werden. Zu Beginn muss das Variogramm berechnet werden. Zu diesem Zweck müssen die Koordinaten der Temperatursensoren sowie die eigentlichen Messwerte bereitgestellt werden. Diese Eingangsdaten sowie die maximale Distanz zwischen den Sensoren werden genutzt, um das empirische Variogramm zu berechnen. Aus diesem kann durch eine weitere Funktion ein passendes theoretisches Variogramm bestimmt werden.

Diese Grundlage wird genutzt, um das eigentliche räumliche Modell mittels Kriging zu

erstellen. Die entsprechende Funktion liefert die Temperaturdaten für das Messgebiet sowie die Krigingvarianz.

Nach Abschluss aller Verarbeitungsschritte müssen die Daten für die weitere Nutzung gespeichert werden. MATLAB bietet zu diesem Zweck die Möglichkeit, die Daten zu exportieren und in MAT-Dateien abzuspeichern. Diese können bei späterer Nutzung wieder importiert werden. Das vorgefertigte Format ist zu 100% mit MATLAB kompatibel, die Daten müssen demnach nicht mehr formatiert werden. Die entsprechende Funktion in der Bibliothek speichert die Daten des Modells und schließt so die Modellierung der meteorologischen Daten ab.

3.2. Streckenkorrektur

Auf Grundlage der Modellierung kann die Korrektur der gemessenen Strecken erfolgen. Auch hier kann die Arbeitsweise der Bibliothek mit dem schon genannten EVA-Prinzip beschrieben werden. Abbildung 9 gibt über die einzelnen Programmabläufe einen detaillierten Überblick.

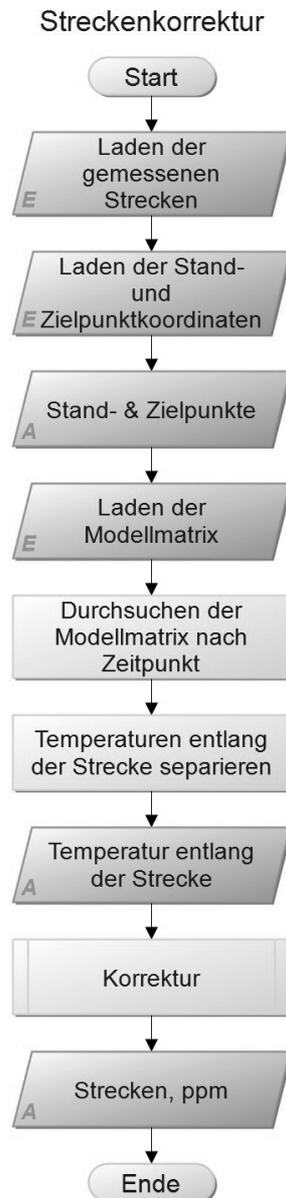


Abbildung 9: Programmablaufplan der Streckenkorrektur

Im ersten Schritt müssen die benötigten Daten eingeladen werden. Dazu gehören die Strecken sowie die Stand- und Zielpunktkoordinaten. Letztere werden benötigt, um innerhalb des meteorologischen Modells zu navigieren und die Werte für die jeweiligen Positionen zu erhalten. Das meteorologische Modell muss ebenfalls importiert werden.

Nach dem Einladen aller Daten müssen einige Verarbeitungsschritte durchgeführt werden,

bevor mit der eigentlichen Korrektur begonnen werden kann. Da sowohl die Streckenmessungen als auch die Erfassung der meteorologischen Daten einen starken Zeitbezug aufweisen, müssen beide Datensätze miteinander synchronisiert werden. In diesem Fall bedeutet das, dass die Zeitpunkte der Streckenmessungen im Modell gefunden werden müssen. Da es unwahrscheinlich ist, dass beide Messungen zum exakt gleichen Zeitpunkt durchgeführt wurden, kann der Nutzer eine Spanne angeben, um die die Zeitpunkte differieren dürfen. Das Ergebnis dieser Synchronisierung ist ein Modellausschnitt, welcher einen zeitlichen Bezug zu der gemessenen Strecke hat. Eine kleine Zeitdifferenz hat dabei nur eine sehr geringe Auswirkung, da Temperaturen in der Regel nicht schlagartig steigen oder sinken. Auf Basis des Ausschnitts kann die Meteorologie entlang der Strecke separiert werden. Dieser Schritt stellt den räumlichen Bezug zwischen Modell und Strecke her. Hierfür werden die geladenen Koordinaten der Stand- und Zielpunkte verwendet. Das Ergebnis dieser Vorverarbeitung sind die Modelldaten entlang der Strecke zum ungefähren Zeitpunkt der Tachymetermessung.

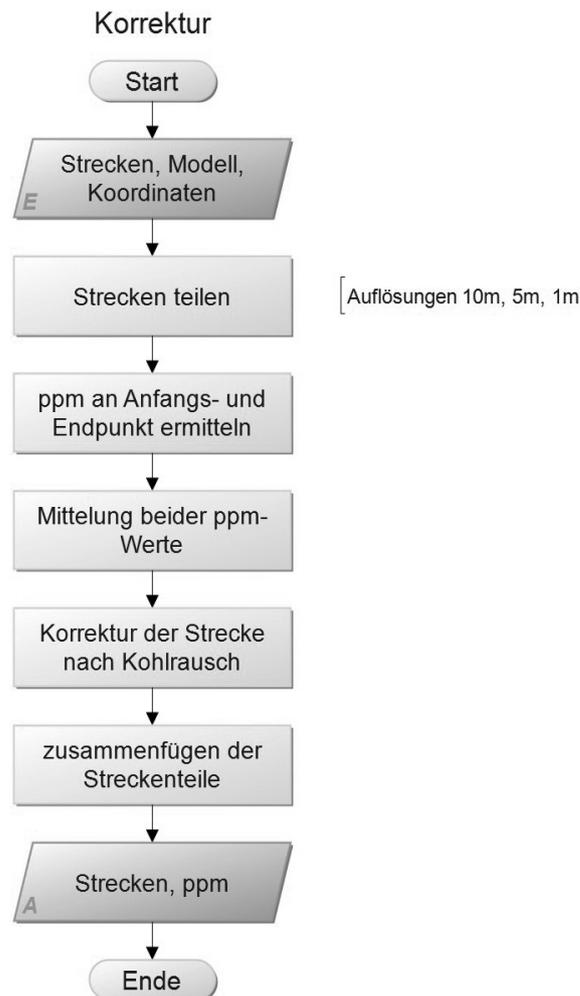


Abbildung 10: Korrektur

Auf Grundlage dessen kann die eigentliche Korrektur (Abbildung 10) erfolgen. Die entwickelte Bibliothek benötigt die Strecke, das zuvor berechnete Modell sowie die Koordinaten der Punkte zwischen denen gemessen wurde. Diese Daten ermöglichen die Berechnung der ppm auf Basis unterschiedlicher Szenarien. Zum Zweck der Veranschaulichung kann die Meteorologie am Stand- und am Zielpunkt zur Berechnung genutzt werden. Die entsprechenden Werte werden ebenfalls aus dem Modell extrahiert. Zusätzlich dazu kann das meteorologische Modell genutzt werden, um die Strecke aufzuteilen und für jeden Abschnitt die ppm zu bestimmen. Der jetzige Entwicklungsstand ermöglicht Auflösungen von 45, 30, 20, 10, 5 sowie einem Meter. Die Strecke wird entsprechend

aufgeteilt und die zugehörigen Temperaturen werden dem Modell entnommen. Aus diesen Eingangsdaten können die ppm-Werte berechnet werden. Dazu werden die ppm- vom Anfangs- und Endpunkt eines jeweiligen Streckenabschnitts berechnet und gemittelt. Der entstandene Wert wird an die Strecke angebracht. Sind alle Streckenabschnitte berechnet, werden die einzelnen Teile wieder zusammengefügt. Das Ergebnis sind die korrigierten Strecken sowie die errechneten ppm-Werte. Diese Daten können entweder in der Konsole ausgegeben oder in eine .csv-Datei gespeichert werden.

4. Ergebnisse

In diesem Kapitel wird die Anwendung der in Kapitel 3 beschriebenen Bibliothek beschrieben. Im ersten Unterkapitel wird die Ausgangssituation in Niederfinow beschrieben. Die erhobenen Daten werden genutzt, um in Kapitel 4.2 die Modellierung und in Kapitel 4.3 Streckenreduktion durchzuführen. Als Überblick ist in Anlage 1 und Anlage 2 eine Übersicht über die verwendeten MATLAB-Dateien zu finden.

4.1. Ausgangssituation in Niederfinow

Die Daten und die Idee zu dieser Masterarbeit entstanden im Rahmen einer Messung am Schiffshebewerk in Niederfinow. In diesem Unterkapitel werden daher Einzelheiten zum Schiffshebewerk, zu den eingesetzten Sensoren und Systemen sowie zu den Gegebenheiten vor Ort skizziert.

Das Bauwerk am Oder-Havel-Kanal wurde 1934 in Betrieb genommen und ermöglicht es Schiffen, den Höhenunterschied von 36 Metern zu überwinden. Aufgrund der gestiegenen Anforderungen ist das alte Hebewerk zu klein für den heutigen Schiffsverkehr. Im Jahr 2009 erfolgte daher die Grundsteinlegung für einen Neubau, dessen Bauzeit sich auf ca. fünf Jahre belaufen soll. Die Kosten für die Gesamtanlagen betragen, laut offiziellen Angaben, ungefähr 285 Millionen Euro. [18]

Zur Unterstützung der Bautätigkeit werden Vermessungsarbeiten durchgeführt. Verantwortlich dafür ist die Ingenieurgesellschaft für Vermessung und Bauwesen mbH (IVB). Die durchgeführten Arbeiten gliedern sich dabei auf in

- Absteckarbeiten und Kontrollmessungen zum Beweissicherungsverfahren,
- Erstellung und Fortschreibung des Messprogramms zur Qualitätssicherung sowie
- die geotechnische Ausrüstung und Messungen.

Aufgrund auftretender Spannungen im abgesteckten Baunetz nahm die IVB Kontakt mit der Hochschule Neubrandenburg auf, um eine Überwachungsmessung durchführen zu lassen. [19]

Aufgrund der vorgegebenen Anforderungen wurde das Monitoringsystem DABAMOS für diese Aufgabe eingesetzt. Bei DABAMOS handelt es sich um ein an der Hochschule Neubrandenburg entwickeltes System zur Überwachung von Objekten. Es steuert geodätische Sensoren an und speichert die gemessenen Daten in einer Datenbank. Zusätzlich dazu stehen Auswertemethoden zur Verfügung, um die ermittelten Daten zu verarbeiten und zu analysieren.

Zur Überwachung des Netzes wurden zwei Kurzzeit-Monitorings durchgeführt. Der erste Einsatz erfolgte vom 02. bis 16. Mai 2012. Die zweite Überwachungsmessung wurde vom 06. bis 17. August durchgeführt. Das Ziel war die Überwachung des Baustellenetzes, welches die Grundlage für die Ausrichtung einzelner Bauelemente bildet. Konkret ging es um die Detektierung von Lage- und Höhenveränderungen und damit um das Aufdecken von Schwachstellen im Netz. Zur Überwachung wurden zwei TM30-Tachymeter der Firma Leica genutzt, welche von zwei Standpunkten insgesamt 11 Punkte im Baunetz aufgemessen haben. Die Messungen erfolgten alle halbe Stunde und erzeugten damit insgesamt ca. 12000 Datensätze. Die Genauigkeit der beiden Geräte beträgt bei dem verwendeten Modus 1 mm + 1 ppm. Die Tachymeter-interne Auto-PPM-Berechnung zur Streckenkorrektur wurde für die Messung in Niederfinow deaktiviert, da eine Verbesserung der Strecken mit Hilfe des entwickelten Modells erfolgen sollte. [20]

Zur Unterstützung der tachymetrischen Überwachungsmessung wurden vier Temperatursensoren genutzt. Diese wurden unabhängig von dem Monitoring auf der Baustelle installiert und lieferten stündlich aktuelle Temperaturen. Aufgrund der Beteiligung unterschiedlicher Firmen und Zulieferer konnten die Verantwortlichen keine Aussage über das Fabrikat oder die Arbeitsweise der Sensoren treffen. Daraus folgt, dass die Genauigkeit der Temperaturmessungen unbekannt ist. Die Positionen der Thermometer wurden von den Vermessern vor Ort auf Dezimeter genau bestimmt.

Eine Übersicht über die Stand- und Zielpunkte des Monitoring liefert Abbildung 11. Die Geräte wurden auf den Punkten 6640 sowie 6300 stationiert. Für die Modellierung wurden die Datensätze des Zielpunkts 6500 ausgewählt. [21]

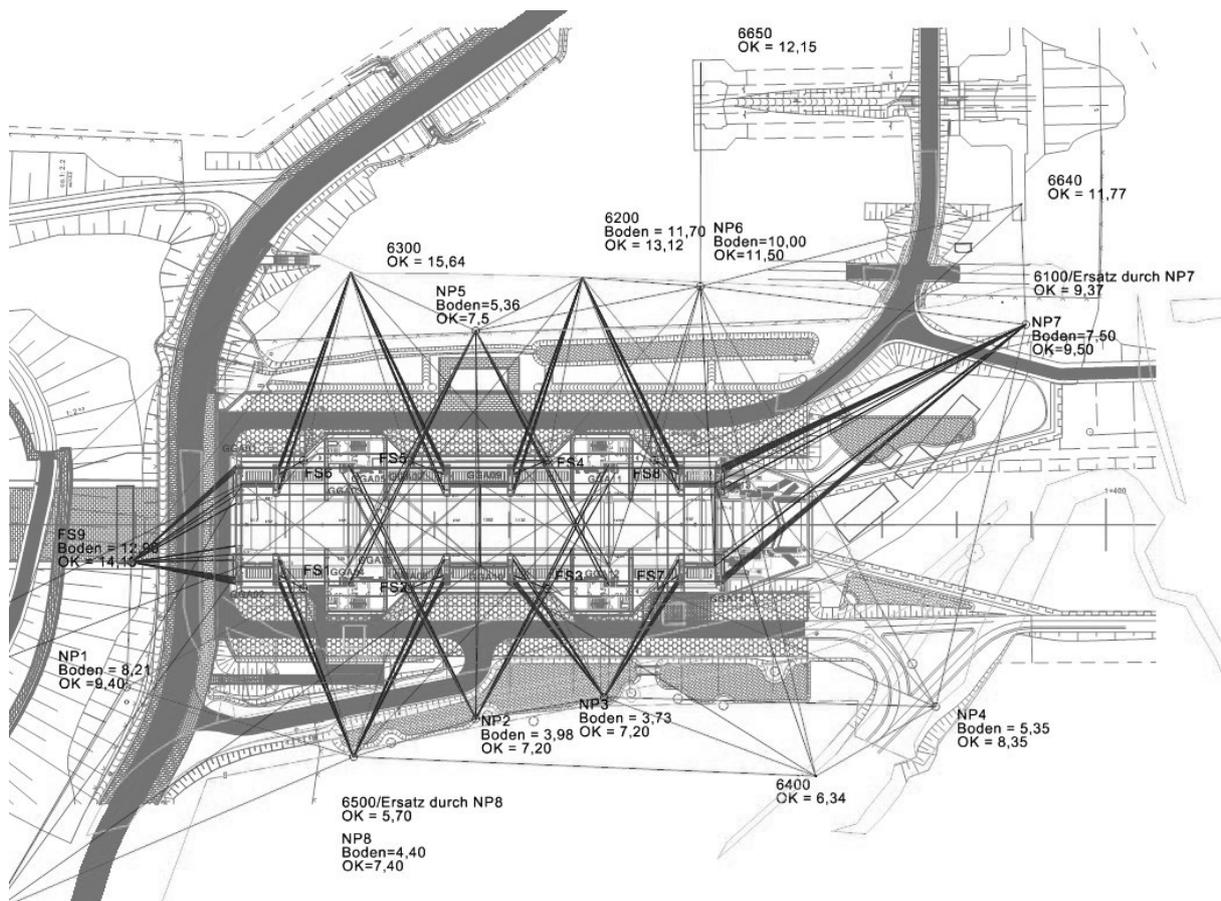


Abbildung 11: Netzplan Niederfinow [21]

4.2. Modellierung

In diesem Kapitel werden die Funktionen der Bibliothek mit realen Daten der Meteorologie-Sensoren verknüpft. Die zur Modellierung genutzten Daten sind am Schiffshebewerk Niederfinow in den Monaten Juli und August detektiert worden.

```

2012-07-01 01:00:00;21.57
2012-07-01 02:00:00;21.24
2012-07-01 03:00:00;20.21
2012-07-01 04:00:00;19.82

```

Abbildung 12: Ausschnitt einer .csv-Datei der Temperatur-Sensoren

Die Daten liegen in Form des schon beschriebenen .csv-Formates vor. Ein Ausschnitt einer ausgelesenen Datei zeigt Abbildung 12. Die Datei besteht aus einer Reihe von Datensätzen mit jeweils einem Zeitstempel und einem Temperaturwert, getrennt durch ein Semikolon. Die Daten sind im Abstand von einer Stunde detektiert worden. Insgesamt werden für diese Modellierung jeweils 1710 Datensätze von den vier Sensoren verarbeitet.

6262.6000	3024.4000	4.4000	0 9 10
6265.3000	3030.2000	5.0000	0 9
6240.3000	2990.7000	-3.3700	0 9
6223.4000	3009.3000	-3.3300	0 9

```
*110001+00000000TLuft_BK 81..16+0000000062626000 82..16+0000000030244000 83..16+000000000044000
*110002+00000000TLuft_KF 81..16+0000000062653000 82..16+0000000030302000 83..16+000000000050000
*110003+000000TLuft_SRTS5 81..16+0000000062403000 82..16+0000000029907000 83..16-0000000000033700
*110004+0000TLuft_SRTS11 81..16+0000000062234000 82..16+0000000030093000 83..16-0000000000033300
```

Abbildung 13: Sensorkoordinaten (oben asc-Format, unten gsi-Format)

Die Koordinaten der Sensoren sind manuell durch die Geodäten Vorort bestimmt worden. Abbildung 13 zeigt zum einen die .gsi-Datei und zum anderen die .asc-Datei. Zur Verwendung der Koordinaten in MATLAB wird die .asc-Datei verwendet. Das Format enthält den Name des Sensors sowie den Ost- und Hochwert. Zusätzlich dazu können die Höhe und zusätzliche Informationen entnommen werden.

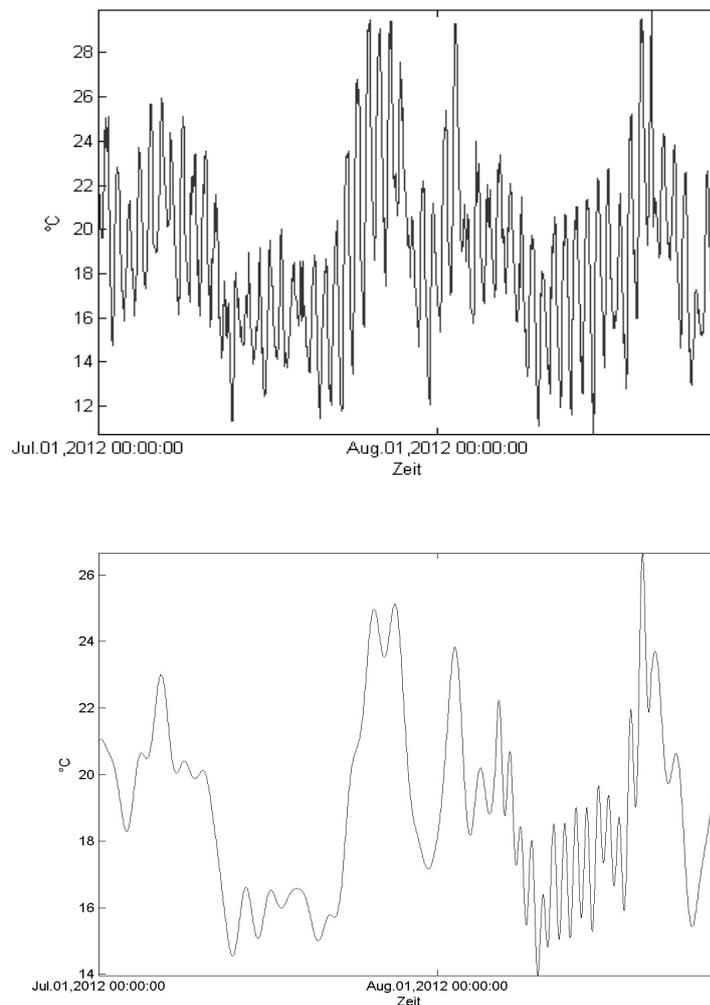


Abbildung 14: Daten eines Temperatursensors

Als Ergebnis werden nach dem Einladen der Daten die Diagramme der entsprechenden meteorologischen Einflussgrößen visualisiert. Abbildung 14 zeigt exemplarisch einen einfachen Plot der Temperaturdaten über den angegebenen Zeitraum. Die Zeitspanne zwischen zwei Messungen beträgt eine Stunde, der Messzeitpunkt ist immer zur vollen Stunde. Ein Merkmal dieser Zeitreihe sind die Tagesgänge, welche durch relativ starke Differenzen zwischen den Tag- und Nachttemperaturen gekennzeichnet sind. Die Spanne der Temperaturen reicht von 11°C bis 30°C. Zusätzlich dazu ist ein gewisser Trend der Daten zur erkennen, welcher als Teil eines zu erwartenden Jahresgangs interpretiert werden kann.

Nach dem Einladen werden die Daten, wie schon im Programmablaufplan der Modellierung gezeigt, gefiltert. Die Auswirkungen dieser Filterung auf die Temperaturdaten zeigt ebenfalls Abbildung 14. Der angewandte Filter ist eine Faltung mit Hilfe einer Gauß-Funktion. Das Ergebnis ist eine geglättete Funktion. Das Rauschen hat dadurch stark abgenommen. Die entsprechende Werte werden für die Weiterverarbeitung genutzt.

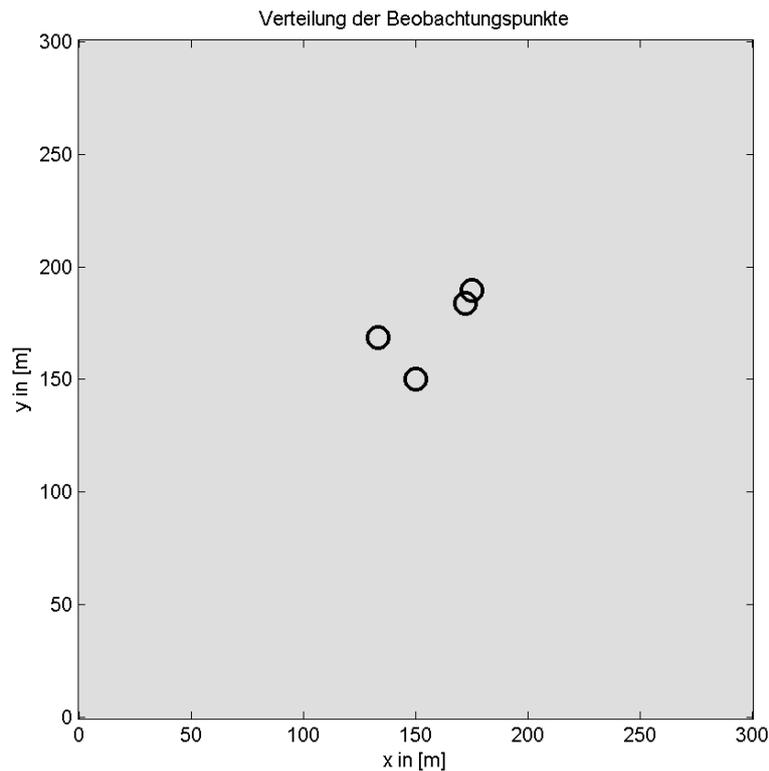


Abbildung 15: Messgebiet

Im weiteren Verlauf der Verarbeitung werden die Daten mit den Koordinaten verknüpft. Um eine Übersicht über das Messgebiet und die Lage der Sensoren zu erhalten, produziert die Bibliothek eine entsprechende Ausgabe. Die Abbildung 15 zeigt die Größe des Messgebiets, in diesem Fall eine Fläche von 300 x 300 Metern. Die Größe kann vom Benutzer vorgegeben werden. Sie sollte sich aber an den wahren Abmaßen des Messgebiets orientieren. Die Verteilung der Sensoren wird mit Hilfe der Kreise visualisiert. In dem Bild wird deutlich, dass die Lage der Messgeräte auf das Zentrum beschränkt ist. Optimal wäre eine gleichmäßige Verteilung über das gesamte Gebiet. Es ist zu erwarten, dass sich die Standpunkte der

Sensoren negativ auf das Ergebnis der Modellierung und damit auch auf die Korrektur der Strecken (vgl. Kapitel 4) auswirken.

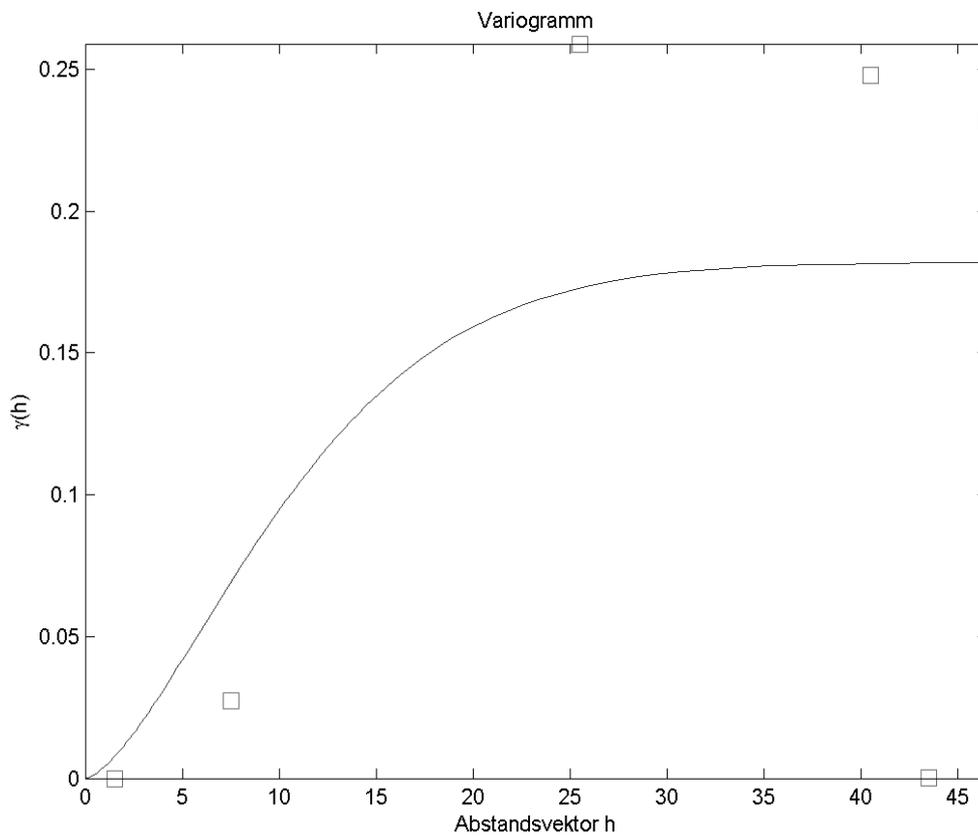


Abbildung 16: Variogramm

Auf Grundlage der vorherigen Schritte kann die räumliche Interpolation durchgeführt werden. Dazu wird ein theoretisches Variogramm auf Basis des Sphärischen Modells (Abbildung 16) erzeugt. Zur Kontrolle wird auch hier ein entsprechendes Bild durch die Bibliothek bereitgestellt. Der erste Datensatz aus Niederfinow zeigt die erwartete monoton-wachsende Funktion. Die roten Kästchen entsprechen dem empirischen Variogramm, mit deren Hilfe das theoretische Variogramm geschätzt wurde.

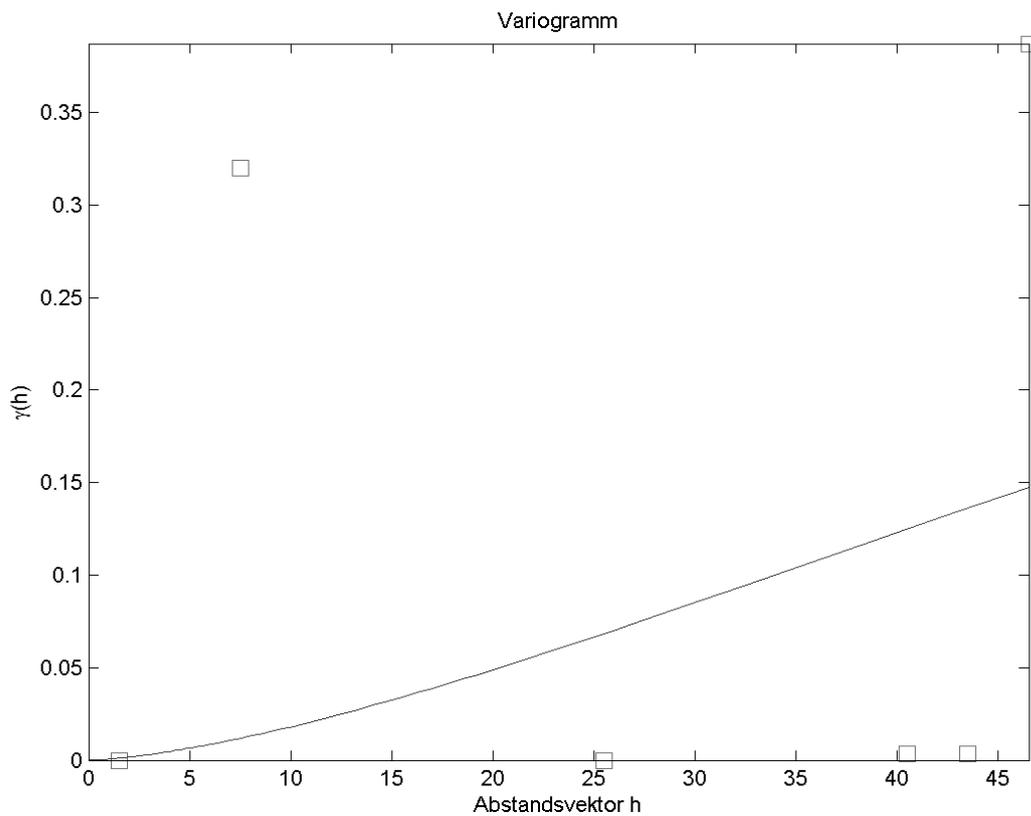


Abbildung 17: Variogramm ungefiltert

Um die Auswirkungen des Filter zu demonstrieren, zeigt Abbildung 17 das geschätzte Variogramm aus den Rohdaten. Der Unterschied ist sehr deutlich. Die Funktionen der Abstandsvektoren differieren sehr viel stärker, weshalb eine Schätzung erschwert wird. Das Ergebnis ist eine eher lineare als eine monoton-wachsende Funktion. Die ungefilterten Daten sind daher in keinem Fall für eine direkte Weiterverarbeitung geeignet.

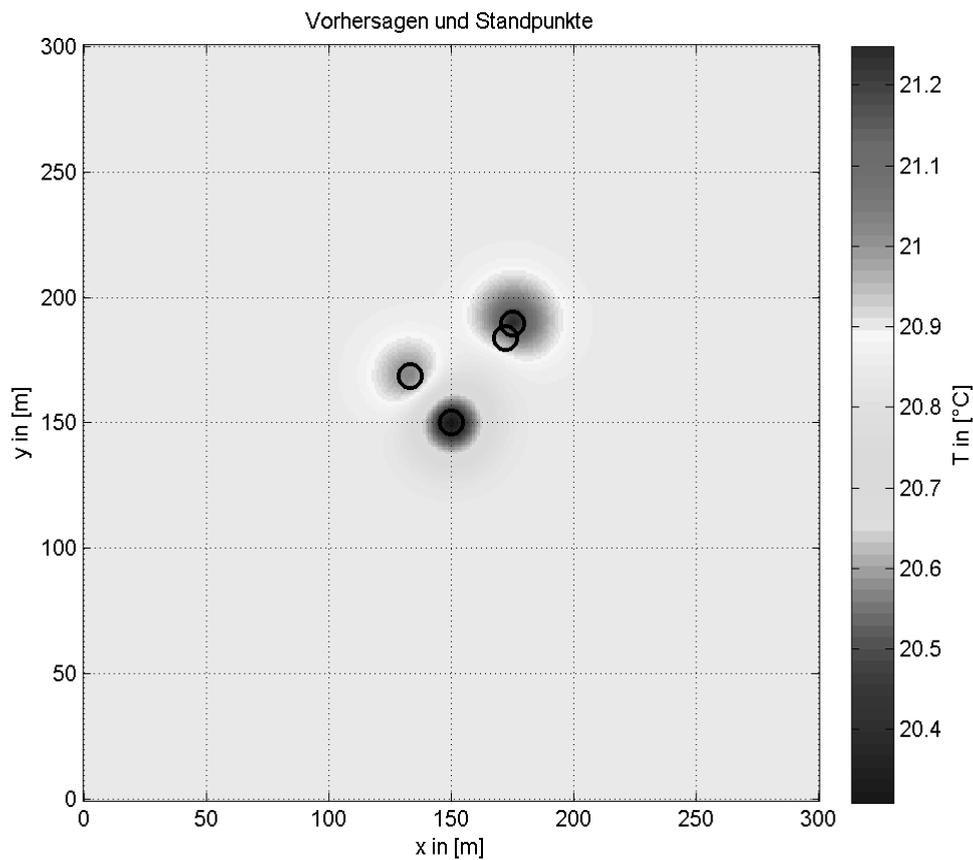


Abbildung 18: Ergebnis des Kriging

Wie im Programmablaufplan gezeigt, kann nach der Erzeugung des theoretischen Variogramms der Kriging-Algorithmus durchlaufen werden. Das Ergebnis sind die interpolierten Messdaten für das Beobachtungsgebiet. Die Bibliothek ermöglicht auch hier eine Ausgabe als Bild (Abbildung 18). Es zeigt die Lage der Sensoren und die interpolierten Temperaturen. Zusätzlich dazu wird die Spanne der Messwerte durch eine Farbskala visualisiert. Der größte Temperaturunterschied beträgt ca. 1° Celsius. Die Ausgabe macht ebenfalls die ungünstige Verteilung der Sensoren deutlich. Zum einen betrifft dies die relative Nähe der Sensoren zueinander. Zum anderen lassen die geringen Temperaturunterschiede vermuten, dass die Bedingungen an den Positionen ähnlich und damit nicht repräsentativ für das gesamte Messgebiet sind.

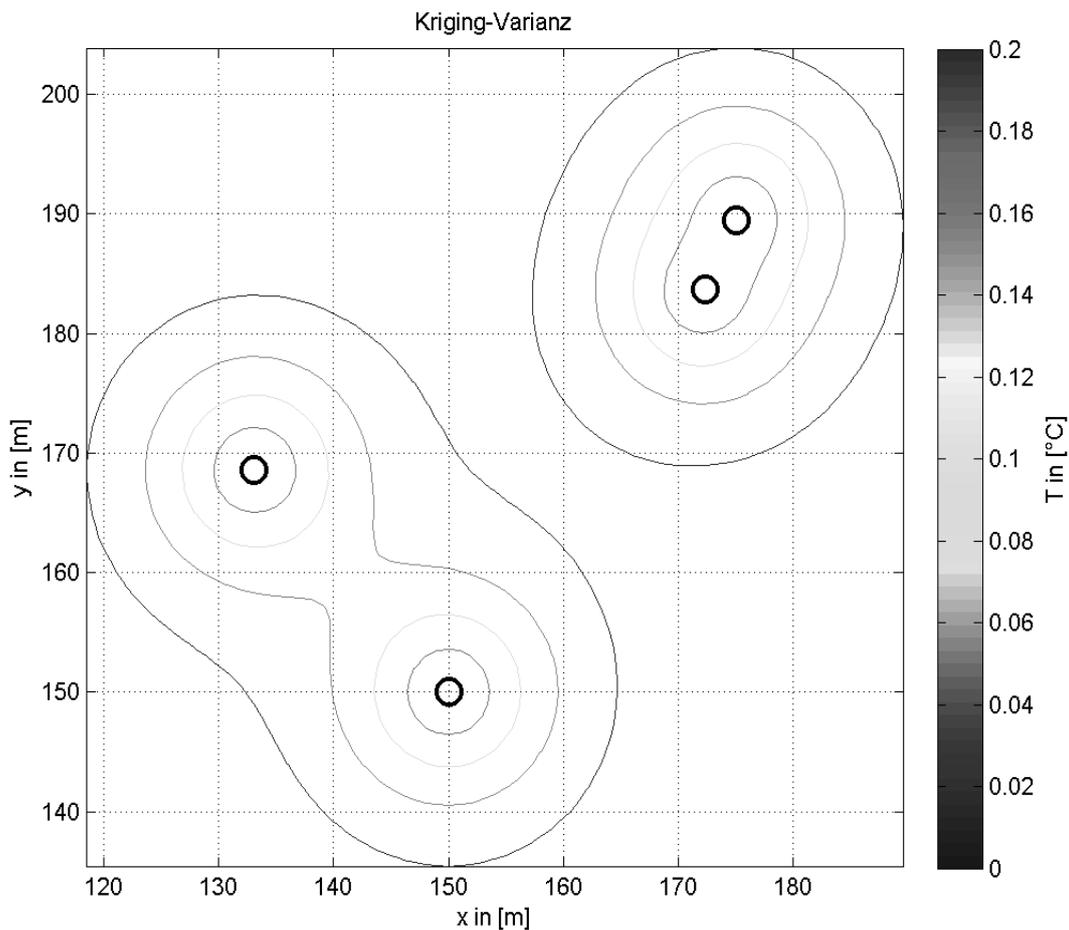


Abbildung 19: Krigingvarianz

Zur Einschätzung der Güte des berechneten Modells kann die Kriging-Varianz genutzt werden. Diese wird ebenfalls durch die Bibliothek bestimmt und in Abbildung 19 visualisiert. Das Diagramm gibt wieder, in welchen Bereichen des Messgebiets ein Informationsmangel vorliegt. Umso größer der Abstand zu den beprobten Messpunkten, desto größer ist die Kriging-Varianz. Zu beachten ist, dass das Diagramm eine Fläche von ca. 200 x 190 Meter zeigt. Es wird deutlich, dass die linke obere sowie die rechte untere Ecke und auch die Ränder des Messgebiets keine Messinformationen enthalten. Daraus ergibt sich, dass die vier platzierten Sensoren nicht ausreichen, um die Verhältnisse dort ausreichend wider zu spiegeln. Vor allem sich wechselnde Bedingungen können so in dem berechneten Modell nicht berücksichtigt werden. Bei einer Messung über eine Straße oder durch schattige Areale finden

die dadurch entstehenden Temperaturschwankungen demnach keine Berücksichtigung.

Abschließend werden die Ergebnisse in zwei Cellarrays zusammengefasst und gespeichert. Im Fall der Messdaten aus Niederfinow entstehen Arrays mit jeweils 1710 Matrizen des Messgebiets. Jede Matrix enthält 301 x 301 Gitterpunkte mit interpolierten Temperaturwerten oder der entsprechenden Kriging-Varianz. Die Größe der entstehenden Dateien beträgt 598 MB sowie 684 MB. Diese MAT-Dateien können für die spätere Verwendung mit Hilfe der load-Funktion geladen und wie normale Variablen verwendet werden. Dieser Schritt stellt das Ende der eigentlichen Modellierung dar.

4.3. Streckenkorrektur

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse der Streckenkorrektur skizziert. Die zugrunde liegenden Funktionen und Abläufe wurden bereits in Kapitel 3.2 erläutert. Der Datenbestand ergibt sich aus der in Kapitel 4.1 beschriebenen Ausgangssituation.

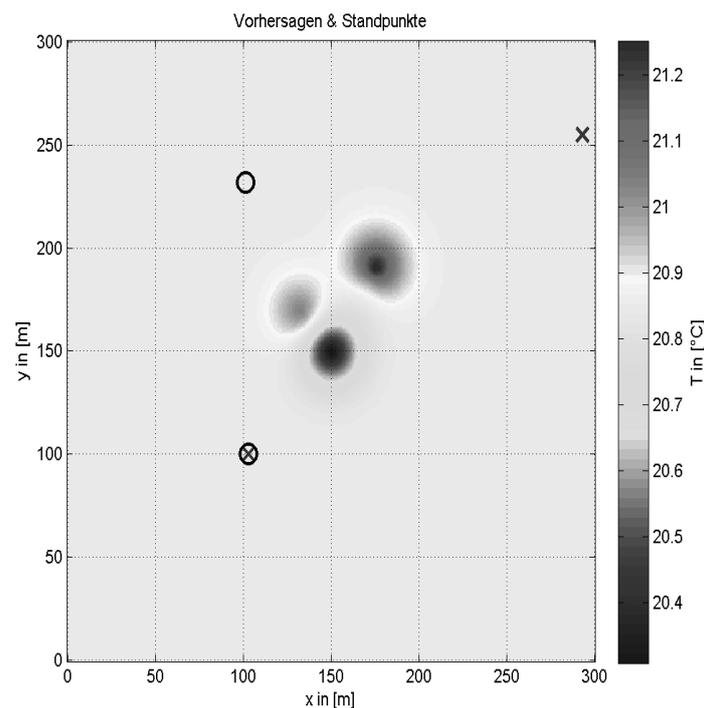


Abbildung 20: Modell und Stand- & Zielpunkte

Nach dem Einladen der Daten werden in Abbildung 20 das meteorologische Modell sowie

Stand- und Zielpunkte der geodätischen Sensoren dargestellt. Im Rahmen dieser Masterarbeit werden zwei Standpunkte (X und O) betrachtet, von denen ein und der selbe Reflektor angemessen wurde. Die Standpunkte tragen im Rahmen der Niederfinow-Messung die Bezeichnungen 6640 (X) sowie 6300 (O). Der Reflektor ist mit dem Punkt 6500 identisch und liegt in der Abbildung ungefähr bei 100/100. Die gemessenen Entfernungen betragen ca. 245 sowie 131 Meter.

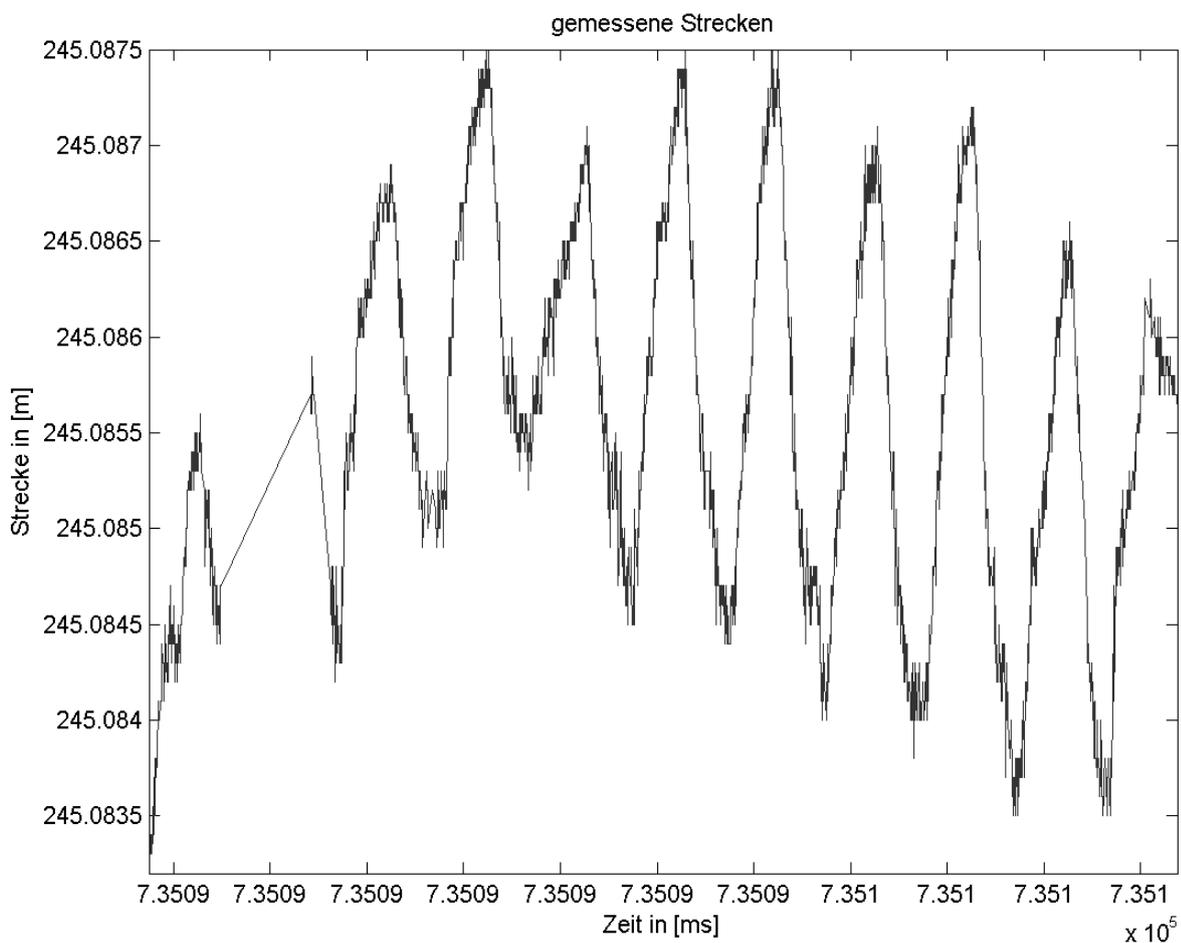


Abbildung 21: Strecken 6640

Abbildung 21 zeigt die gemessenen Strecken von 6640 während des gesamten Zeitraums der Überwachung.

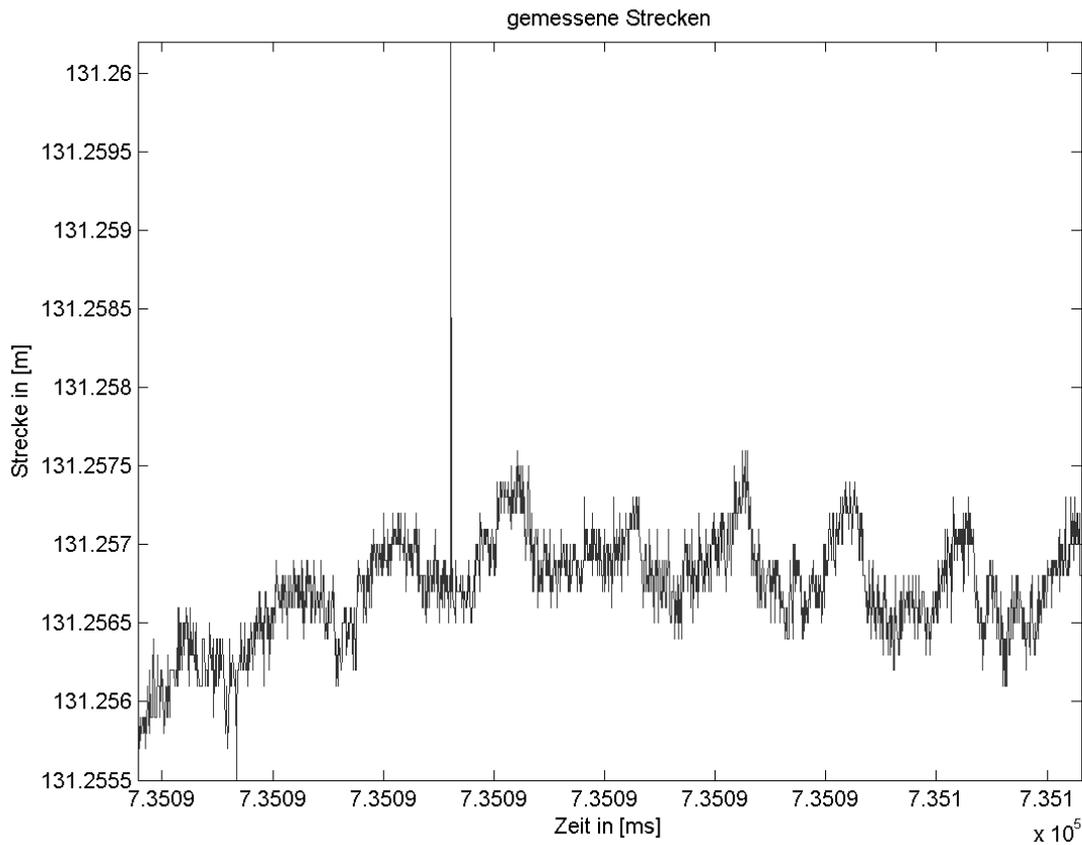


Abbildung 22: Strecken 6300-6500

Der Vollständigkeit halber zeigt Abbildung 22 die Strecken des auf Punkt 6300 platzierten Tachymeters.

Im Vergleich der beiden Streckenmessungen ist auffällig, dass die Daten von 6300 wesentlich weniger schwanken. Bis auf einige Ausreißer ist die Spanne der Strecken auf 1,5 mm begrenzt. Im Gegensatz dazu variiert die Strecke von 6640 um ca. 4 mm. Auch die Tagesgänge sowie der angedeutete Trend sind stärker ausgeprägt. Dies ist zum einen auf die unterschiedlichen Längen der Strecken zurückzuführen. Zum anderen sind unterschiedliche Bedingungen an den Standpunkten als Ursache anzuführen. Der Punkt 6640 ist freistehend und den ganzen Tag der vollen Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Der Pfeiler von 6300 dagegen ist in einer Allee platziert, wodurch der Sensor vor der Sonne geschützt wird.

Alle Daten enthalten keine Korrekturen und sind daher mit den in Kapitel 2.1 beschriebenen Fehlereinflüssen behaftet.

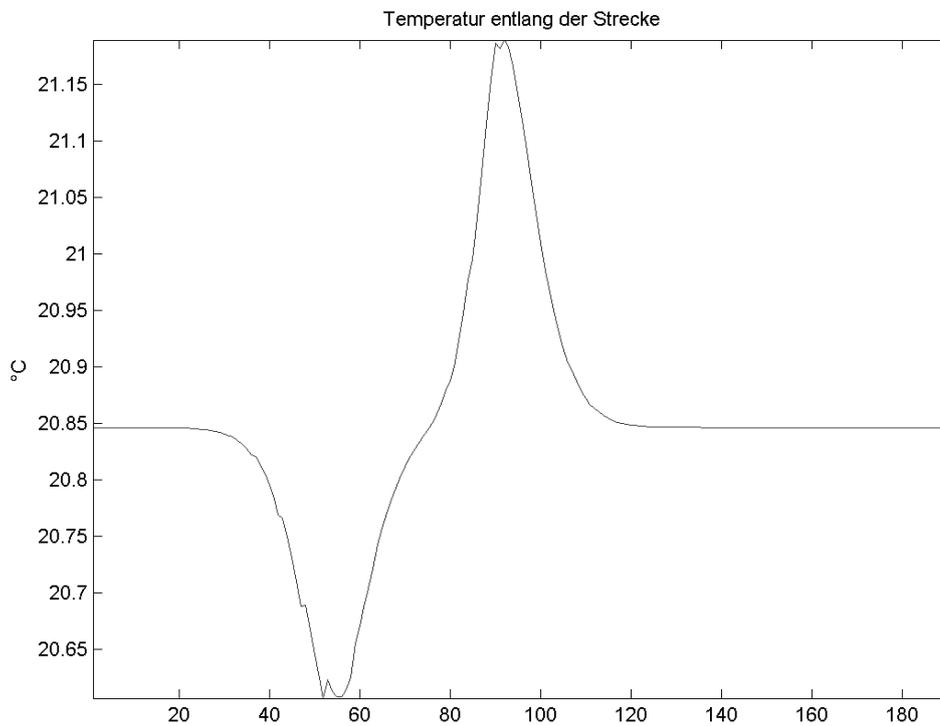


Abbildung 23: Temperatur entlang der Strecke 6640-6500

Wie im Programmablaufplan beschrieben werden nach dem Darstellen der Strecken, die Temperaturen zwischen den Messpunkten separiert. Dazu werden die ungefähren Koordinaten der Stand- und Zielpunkte benötigt. Abbildung 23 zeigt die modellierten Temperaturen zwischen 6640-6500. Die Temperaturen erreichen im Mittel einen Wert von ca. 20.9°C. Die größte Spanne liegt bei ca. 0,5°C.

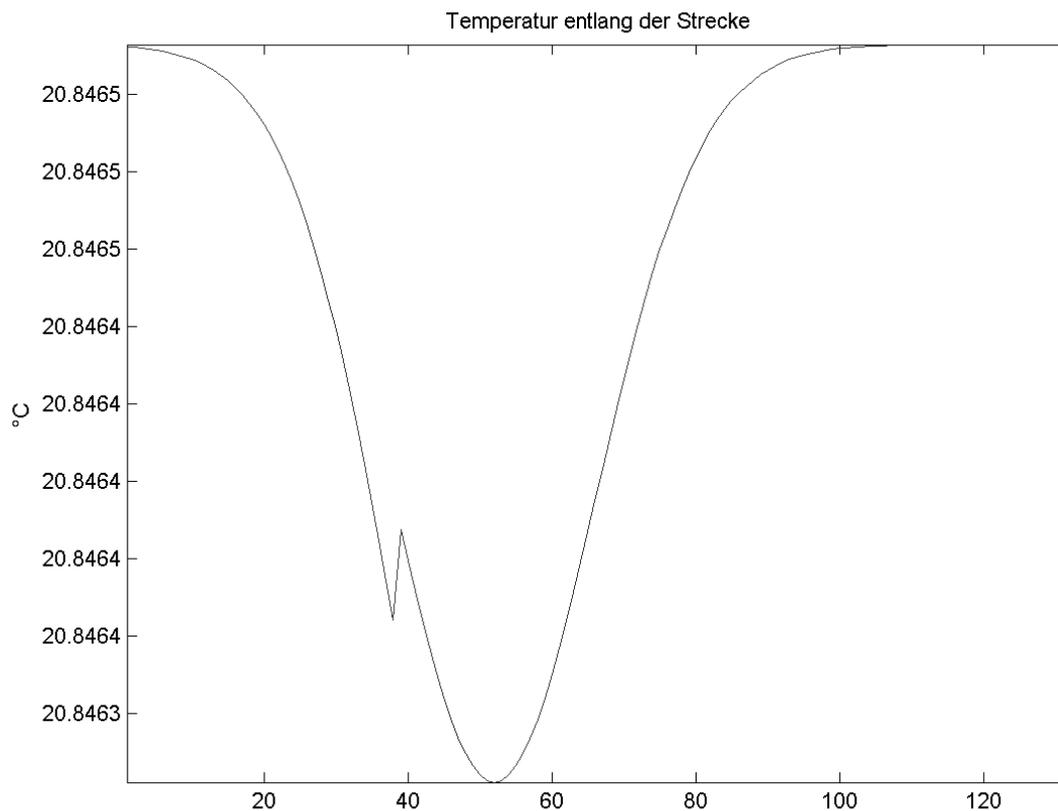


Abbildung 24: Temperatur entlang der Strecke 6300-6500

Auch für die Strecke 6300-6500 werden die Temperaturwerte angezeigt (Abbildung 24). Die Schwankungen sind deutlich geringer und in einem zu vernachlässigen Bereich, da die Temperaturmessung eine Genauigkeit von maximal $0,2^{\circ}\text{C}$ hat. Hier wird ein Mittel von ca. $20,8^{\circ}\text{C}$ erreicht.

Auf Grundlage der Eingangsdaten kann die eigentliche Korrektur durchgeführt werden. Dazu werden die Zeitpunkte aller Streckenmessungen mit den Zeitpunkten des Modells abgeglichen. Somit wird sichergestellt, dass die Temperaturen zeitlich zu den Strecken passen. Aus dem entsprechend ausgewählten Modell werden die jeweiligen Temperaturen entlang der Strecke separiert (vgl. Abbildung 24).

Der nächste Schritt besteht darin, die Strecken mit den herkömmlichen Methoden zu korrigieren. Dabei werden die Temperaturen vom Stand- und Zielpunkt genutzt, um die ppm-Werte zu berechnen und anzuwenden. Die Tabelle 2 sowie Tabelle 4 fassen die Ergebnisse für

beide Standpunkte zusammen. Es wird jeweils der Mittelwert, der Maximal- sowie der Minimalwert aus allen Daten der Zeitreihe ermittelt. Zur bessere Übersicht sind in Tabelle 3 und Tabelle 5 die Differenzen zwischen der einfachen Messung und den Korrekturen nach der herkömmlichen Methode aufgezeigt.

	unkorrigierte Strecke [m]	Standpunkt-korrigierte Strecke [m]	Zielpunkt-korrigierte Strecke [m]
Mittelwert	131,2567	131,2576	131,2575
Max	131,2602	131,2612	131,2612
Min	131,2555	131,2566	131,2566

Tabelle 2: herkömmliche Korrektur 6300

	Differenz Standpunkt- korrigierte Strecke [mm]	Differenz Zielpunkt- korrigierte Strecke [mm]
Mittelwert	-0,8	-0,8
Max	-1,0	-1,0
Min	-1,1	-1,1

Tabelle 3: herkömmliche Korrektur 6300 Differenzen

Beim Punkt 6300 zeigt sich, dass die Differenz zwischen der Stand- und Zielpunktkorrektur sehr gering ist. Diese minimalen Unterschiede sind größtenteils durch Ungenauigkeiten bei der Rundung bedingt.

	unkorrigierte Strecke [m]	Standpunkt-korrigierte Strecke [m]	Zielpunkt-korrigierte Strecke [m]
Mittelwert	245,0856	245,0871	245,0871
Max	245,0875	245,0886	245,0886
Min	245,0832	245,0856	245,0856

Tabelle 4: herkömmliche Korrektur 6640

	Differenz Standpunkt- korrigierte Strecke [mm]	Differenz Zielpunkt- korrigierte Strecke [mm]
Mittelwert	-1,5	-1,5
Max	-1,1	-1,1
Min	-2,4	-2,4

Tabelle 5: herkömmliche Korrektur 6640 Differenzen

Im Gegensatz dazu wirken sich die Korrekturen bei der Streckenmessung von dem Pfeiler 6640 sehr viel stärker aus. Bei einer Streckenlänge von ca. 245,08 Meter haben die angebrachten Parameter einen Einfluss von 1,5 mm im Mittel. Der Unterschied zwischen der Stand- und Zielpunktkorrektur ist aber auch hier wieder nur minimal.

Die Besonderheit des errechneten Modells ist die hohe Auflösung, mit der die Temperaturdaten vorliegen. Dieser Umstand wird im nachfolgenden Schritt dazu genutzt, die Strecken in Abschnitte aufzuteilen. Diese Teilstrecken werden jede für sich korrigiert. Die Auflösung beträgt dabei zehn Meter, fünf Meter sowie ein Meter. Die nachfolgenden Tabellen stellen die Ergebnisse analog zur herkömmlichen Verbesserungsmethode dar.

	unkorrigierte Strecke [m]	Strecke 10m Auflösung [m]	Strecke 5m Auflösung [m]	Strecke 1m Auflösung [m]
Mittelwert	131,2567	131,2576	131,2576	131,2576
Max	131,2602	131,2612	131,2612	131,2612
Min	131,2555	131,2566	131,2566	131,2566

Tabelle 6: Modell-Korrektur 6300

	Differenz 10m Korrekturauflösung [mm]	Differenz 5m Korrekturauflösung [mm]	Differenz 1m Korrekturauflösung [mm]
Mittelwert	-0,8	-0,8	-0,8
Max	-1,0	-1,0	-1,0
Min	-1,1	-1,1	-1,1

Tabelle 7: Modell-Korrektur 6300 Differenzen

	unkorrigierte Strecke [m]	Strecke 10m Auflösung [m]	Strecke 5m Auflösung [m]	Strecke 1m Auflösung [m]
Mittelwert	245,0856	245,0871	245,0871	245,0871
Max	245,0875	245,0886	245,0886	245,0886
Min	245,0833	245,0856	245,0856	245,0856

Tabelle 8: Modell-Korrektur 6640

	Differenz 10m Korrekturauflösung [mm]	Differenz 5m Korrekturauflösung [mm]	Differenz 1m Korrekturauflösung [mm]
Mittelwert	-1,5	-1,5	-1,5
Max	-1,1	-1,1	-1,1
Min	-2,3	-2,3	-2,3

Tabelle 9: Modell-Korrektur 6640 Differenzen

Die dargestellten Tabellen spiegeln ein ähnliches Verhalten wie bei der herkömmlichen Korrektur wider. Die Differenzen zwischen 10m-, 5m- und 1m Auflösung sind identisch mit den Korrekturen der Stand- und Zielpunkte. Zusätzlich dazu gibt es auch hier wieder Unterschiede zwischen den Strecken. Diese resultieren aus der unterschiedlichen Streckenlänge.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperaturkorrektur in jedem Fall notwendig ist, da der Einfluss oberhalb der Genauigkeit liegt. Die daraus entstehenden Verbesserungen betragen bei allen Verfahren ca. einen Millimeter, obwohl die Streckenlängen mit ca. 131 Metern und ca. 245 Metern vergleichsweise kurz ausfallen. Ein Unterschied zwischen den einzelnen Modellen sowie der herkömmlichen Korrektur ist dabei nicht festzustellen. Die Ergebnisse sind nahezu identisch, kleinere Unterschiede sind zum Teil durch Rundungsfehler innerhalb der Software bedingt. Eine Temperaturkorrektur für kurze Strecken entlang des Messstrahls ist nach dem jetzigen Erkenntnisstand demnach nicht notwendig. Jedoch stellen die skizzierten Ergebnisse nicht das volle Potenzial des Modells heraus. Die vorher beschriebenen Ergebnisse sind vor allem mit dem ungünstigen Messaufbau zu begründen, wie er infolge der Niederfinow-Messungen vorgegeben war. Die Verteilung der Temperatursensoren sowie die Anordnung der Streckenmessungen sind für ein aussagekräftiges Resultat nicht geeignet. Aus

diesem Grund soll in dem folgenden Unterkapitel ein simulierter Versuchsaufbau beschrieben werden.

4.4. Simulation

Zur besseren Veranschaulichung wird ein Messgebiet simuliert, in dem die Bedingungen für die Streckenmessung erschwert sind. Die meteorologischen Sensoren werden in einem Raster angeordnet, sodass die Verhältnisse im Gebiet adäquat beschrieben werden können. Der Abstand zwischen den Sensoren beträgt 60 Meter. Das gesamte Gebiet hat eine Ausdehnung von 360 x 360 Meter. Da die tachymetrische Überwachungsmessung im Vordergrund steht, wird nur die Modellierung der Temperatur betrachtet.

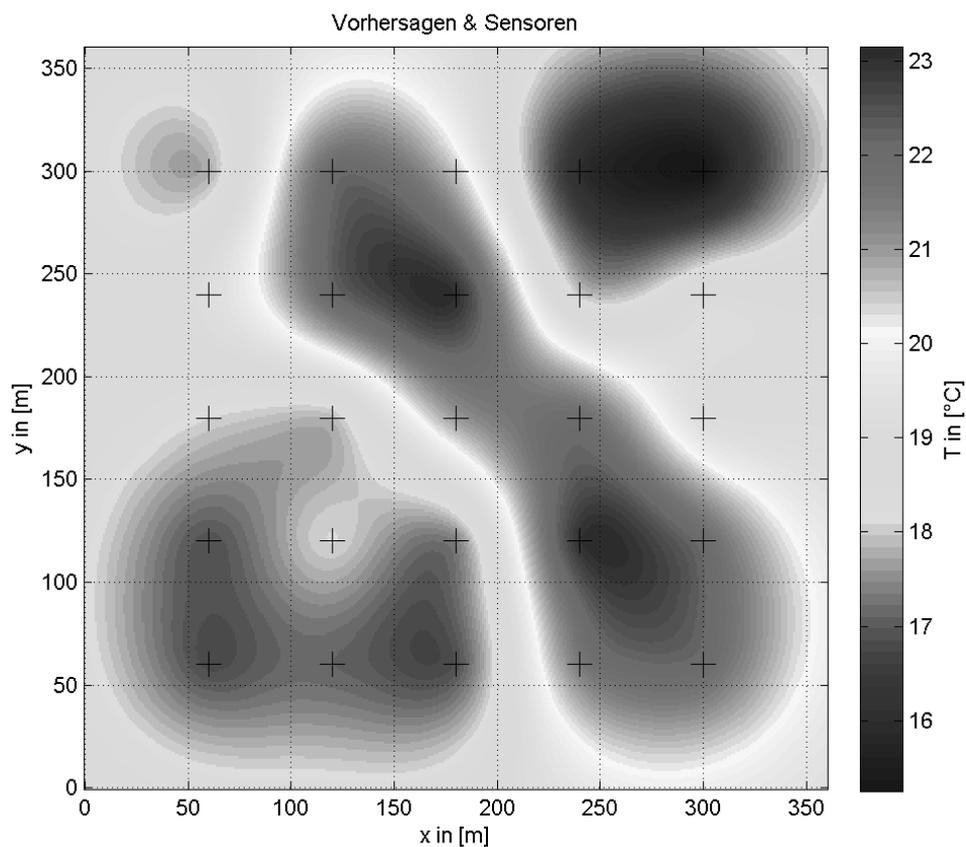


Abbildung 25: Messgebiet der Simulation

Abbildung 25 zeigt das nach den beschriebenen Vorgaben simulierte Messgebiet. Die

Standorte der Sensoren sind mit einem Plus gekennzeichnet. Das Areal ist gekennzeichnet durch relativ starke Temperaturschwankungen von bis zu 8°C. Ein relativ warmes Temperatur-Band zieht sich mittig durch das Gebiet. Die Randzonen sind im Vergleich dazu sehr viel kälter. Das beschriebene Modell kann bspw. ein Teil einer Überwachung einer Autobahnbrücke sein. Die warme Zone entspricht in diesem Fall dem Asphaltband der Fahrbahn, die kälteren Bereiche sind Wiesen und kleinere Gewässer an dessen Rand. Eine solche Konstellation führt im Rahmen eines Monitoring häufig zu erheblichen Einflüssen auf die Messung. Die Standpunkte können nicht verändert werden, da im laufenden Betrieb bestimmte Vorgaben beachtet werden müssen. Diese ungünstigen Bedingungen müssen daher so exakt wie möglich modelliert werden, damit die entsprechenden Einflüsse richtig bestimmt und korrigiert werden können.

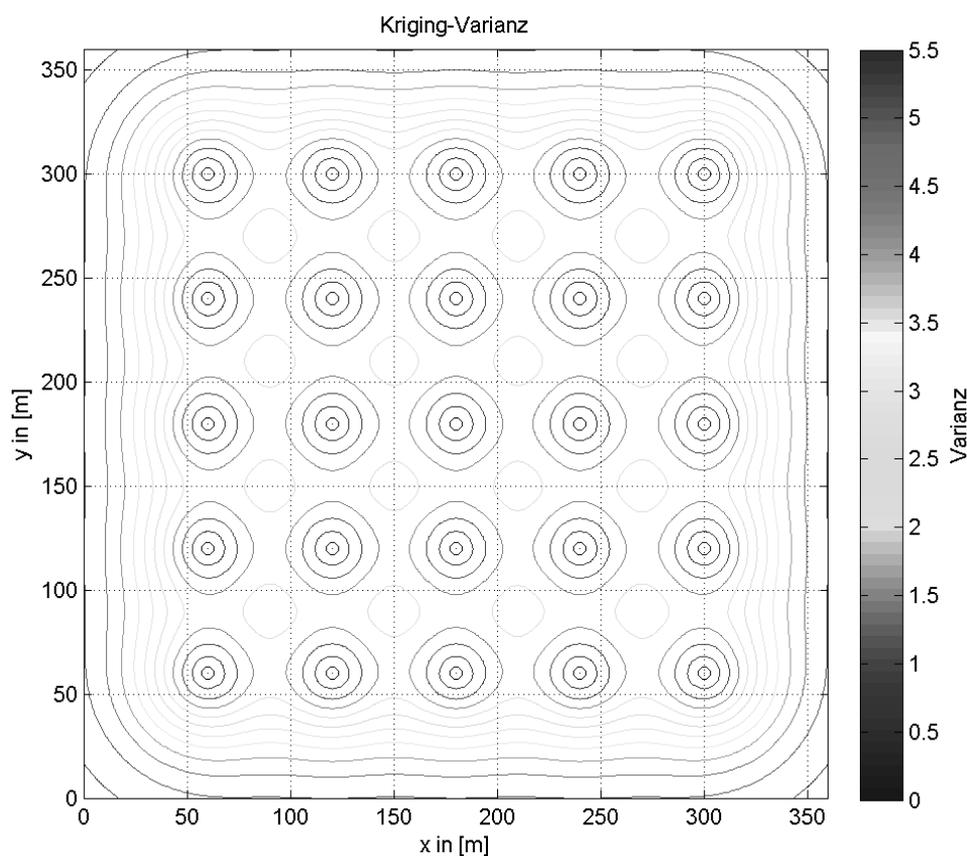


Abbildung 26: Kriging-Varianz der Simulation

Wie schon in der Modellierung der Niederfinow-Daten kann die Einschätzung des simulierten Modells mit Hilfe der Kriging-Varianz (Abbildung 26) erfolgen. Auffällig ist dabei die Regelmäßigkeit des entstehenden Musters, welche mit der Rasteranordnung der Sensoren zu begründen ist. Die Maxima der Kriging-Varianz sind ausnahmslos am Rand des Messgebiets zu finden. Die gegebenen Information genügen demnach, um das Areal mit einer ausreichenden Genauigkeit zu beschreiben. Daraus folgt, dass die interpolierten Werte genutzt werden können, um die eigentliche Streckenkorrektur durchzuführen.

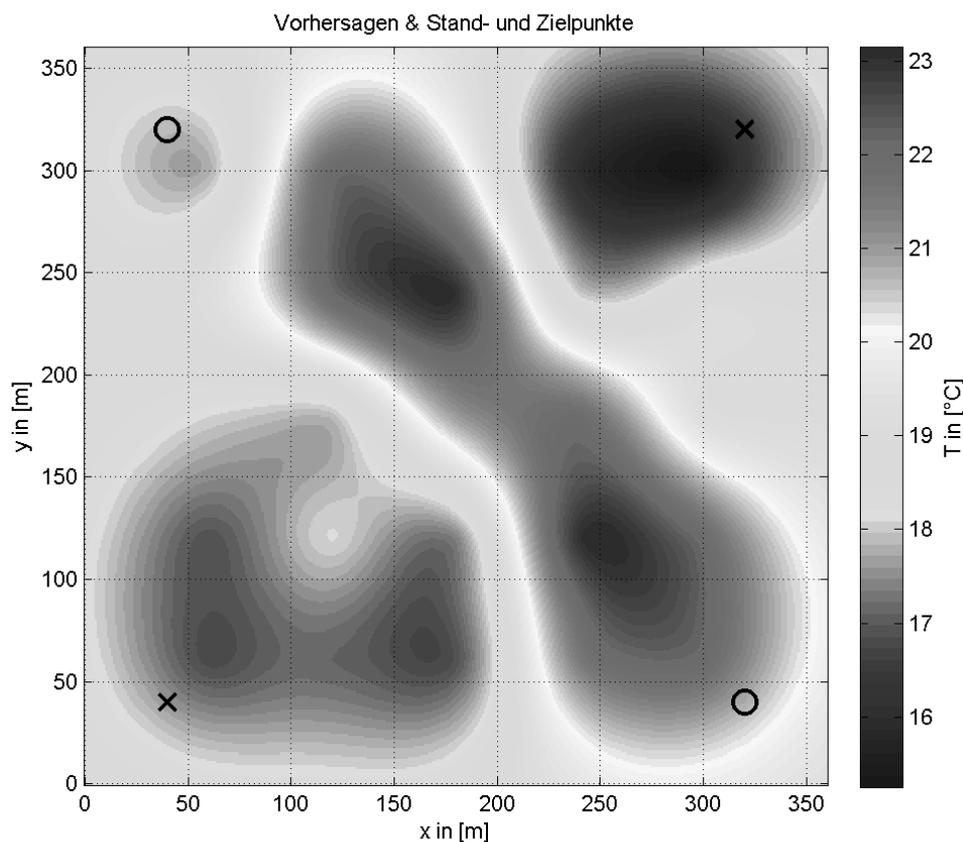


Abbildung 27: Verteilung der Standpunkte in der Simulation

Zur Simulation der Streckenkorrektur werden innerhalb des Messgebiets zwei Sensoren sowie die zugehörigen Messpunkte platziert. In Abbildung 27 ist jeweils ein Sensor- und Zielpunkt-Paar durch zwei Kreuze bzw. Kreise dargestellt. Die Sensoren wurden so platziert, dass die durch den Messstrahl durchlaufenden Areale eine möglichst große Temperaturspanne durchlaufen.

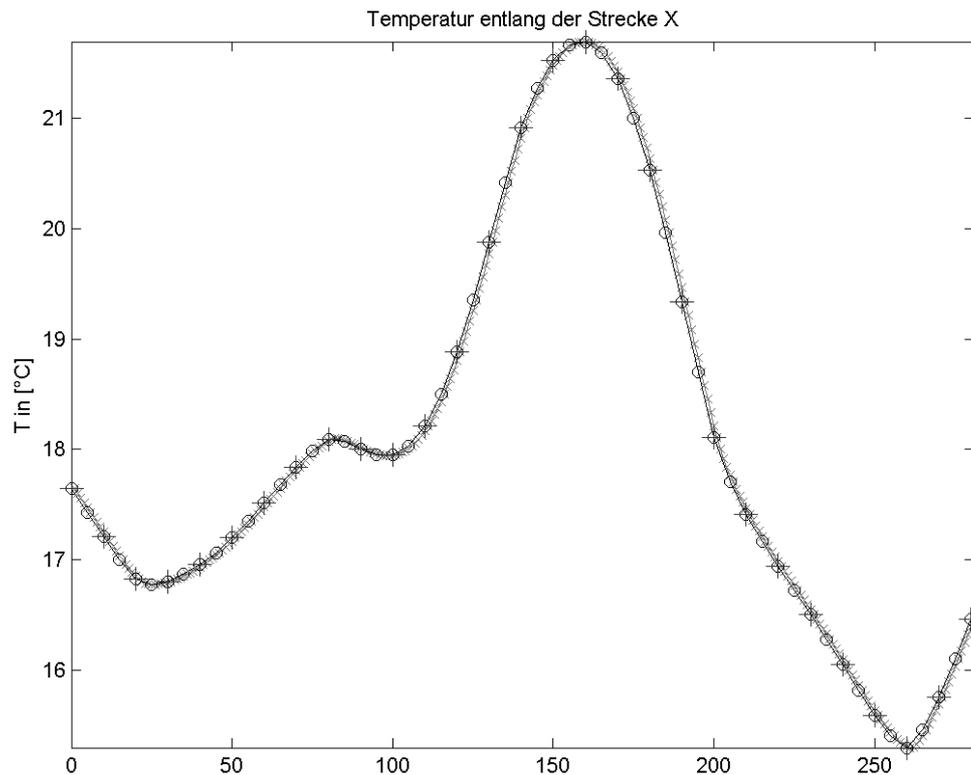


Abbildung 28: Temperatur entlang der simulierten Strecke ($x - x$)

In Abbildung 28 wird der Temperaturverlauf entlang der Strecke zwischen den Standpunkten X visualisiert. Die für die Korrektur benötigten Temperaturen werden je nach Auflösung aus dem meteorologischen Modell extrahiert. Die roten Marker in dem Diagramm repräsentieren die Temperaturen für die Auflösung von einem Meter. Die schwarzen Kreise markieren die Daten für die 5 Meter Auflösung, die Werte für 10 Meter werden mit Hilfe der blauen Kreuze dargestellt.

Die Kurve ist dadurch gekennzeichnet, dass eine sehr große Temperaturspanne entlang des Strahlenganges existiert. Der niedrigste Wert ist ca. 15°C, der höchste ca. 22°C, die Spanne beträgt demnach ca. 7°C. Auffällig ist der Ausschlag in der Mitte der Kurve, wo der Messstrahl das vorher beschriebene Asphaltband kreuzt. Bei einer Temperaturmessung am Stand- und Zielpunkt bleibt ein solcher Anstieg unbemerkt. Die Folge ist, dass der Einfluss der Temperatur nicht exakt berücksichtigt wird und daher zu einer fehlerhaften Korrektur führt.

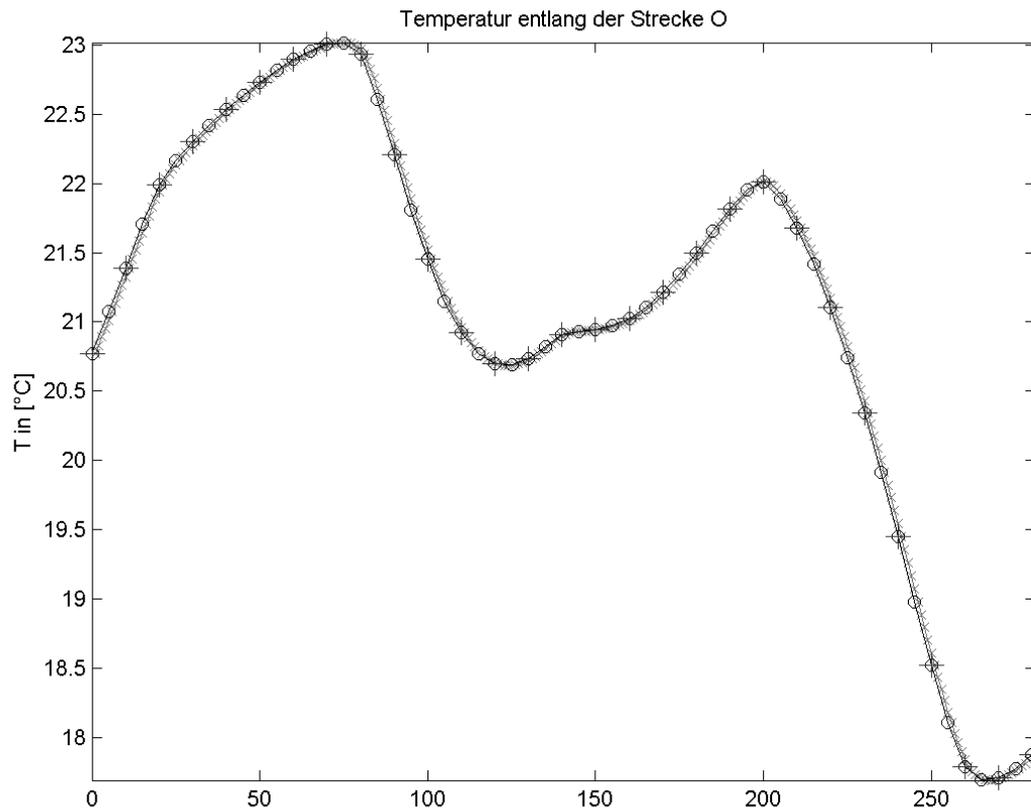


Abbildung 29: Temperatur entlang der simulierten Strecke (o - o)

Analog zum vorherigen Diagramm zeigt Abbildung 29 den Temperaturverlauf entlang des Messstrahls zwischen den Punkten von O. Die Spanne der Werte verhält sich dabei ähnlich, der größte Unterschied beträgt auch hier wieder 7°C . Das Diagramm zeigt ein Gefälle der Temperaturen an, wobei es keine so starken Ausschläge wie in Abbildung 28 gibt. Die ausschließliche Berücksichtigung von Stand- und Zielpunkt gibt aber auch in diesem Fall die Verhältnisse entlang des Strahls nur ungenügend wieder.

Für die bessere Beurteilung der Ergebnisse wird eine erweiterte Bandbreite der Modellauflösung angewandt. Neben den vorher beschriebenen Modellen werden die Temperaturen für die Simulation zusätzlich mit Auflösungen von 20, 30 und 45 Metern berechnet.

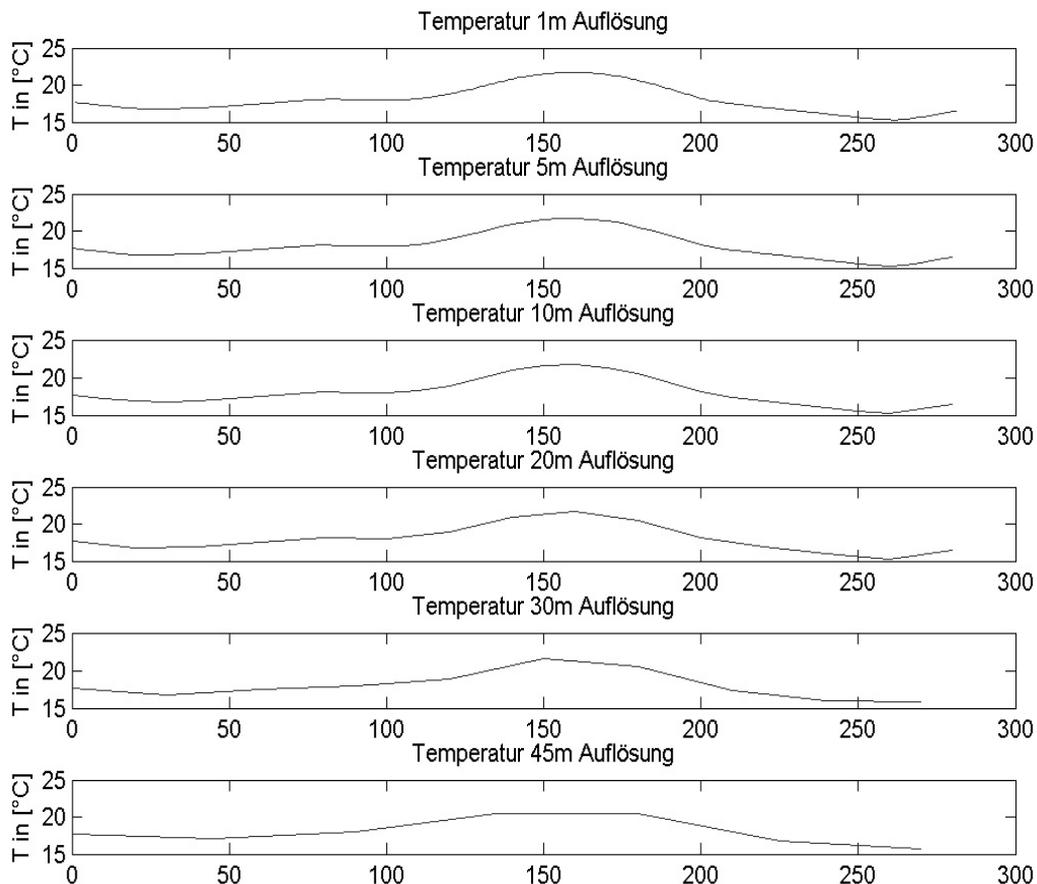


Abbildung 30: Vergleich der Modellauflösungen

Zur besseren Gegenüberstellung der Modellauflösung zeigt Abbildung 30 einen Vergleich der Temperaturkurven entlang des Messstrahls zwischen den Punkten X. Die unterschiedlichen Kurven bilden den Temperaturverlauf mit verschiedenen Auflösungen ab, zeigen aber alle eine ähnliche Form. Die Charakteristik der ersten Kurve mit einer Ein-Meter-Auflösung ist grob noch in der letzten Abbildung erkennbar. Daraus lässt sich die Vermutung ableiten, dass die entsprechenden Auflösungen keine großen Unterschiede in der Streckenkorrektur bewirken. Die resultierenden PPM der Ein-Meter und der 45-Meter-Auflösung und damit die Verbesserungen verhalten sich voraussichtlich ähnlich.

Die eigentliche Korrektur der Strecken erfolgt wieder nach dem in Abschnitt 3.2

beschriebenen Schema.

	Strecke [m]	Differenz [mm]
unkorrigiert	396,2349	
Standpunkt-korrigiert	396,2373	-2,4
Zielpunkt-korrigiert	396,2384	-3,5
Korrekturauflösung 45m	396,2386	-3,7
Korrekturauflösung 30m	396,2386	-3,7
Korrekturauflösung 20m	396,2386	-3,7
Korrekturauflösung 10m	396,2386	-3,7
Korrekturauflösung 5m	396,2386	-3,7
Korrekturauflösung 1m	396,2386	-3,7

Tabelle 10: Auswertung Strecke O

Die Auswertung der simulierten Distanzmessung zwischen den Punkten O ist in Tabelle 10 zusammengefasst. Die berechneten Strecken sowie die Differenz zur unkorrigierten Messung werden gegenüber gestellt. Dabei wird deutlich, dass die Verbesserungen bei einer Streckenlänge von ca. 396 Metern zwischen 2,4 und 3,7 Millimeter betragen. Die Differenz zwischen den Korrektur am Standpunkt und den weiteren Verfahren beträgt dabei mehr als ein Millimeter.

	Strecke [m]	Differenz [mm]
unkorrigiert	396,7311	
Standpunkt-korrigiert	396,7329	-1,8
Zielpunkt-korrigiert	396,7334	-2,3
Korrekturauflösung 45m	396,7336	-2,5
Korrekturauflösung 30m	396,7336	-2,5
Korrekturauflösung 20m	396,7336	-2,5
Korrekturauflösung 10m	396,7335	-2,4
Korrekturauflösung 5m	396,7335	-2,4
Korrekturauflösung 1m	396,7335	-2,4

Tabelle 11: Auswertung Strecke X

Die Tabelle 11 zeigt analog die Auswertung für die Strecke X. Die errechneten Verbesserungen liegen innerhalb von 1,8 bis 2,5 Millimeter. Auch in diesem Fall ist zwischen

der Korrektur am Standpunkt und den anderen Verfahren wieder eine Diskrepanz zu erkennen.

Der Vergleich der beiden Streckenmessungen macht deutlich, dass trotz der sehr ähnlichen Streckenlänge Unterschiede in den berechneten Verbesserungen bestehen. Das ist auf die sehr unterschiedlichen Temperaturkurven entlang des Messstrahls zurückzuführen. Die Temperaturschwankungen der Strecke O sind wesentlich größer als die der Strecke X, weshalb die Differenz der verbesserten Strecken zur unkorrigierten Messung größer ist.

Insgesamt sind die Ergebnisse in der vorliegenden Form überraschend, da der Einfluss des meteorologischen Modells vor der Erstellung dieser Masterarbeit höher eingeschätzt wurde. Die berechneten Verbesserungen sind denen der herkömmlichen Verfahren, bei denen die Meteorologie am Stand- und/oder Zielpunkt ermittelt wird, sehr ähnlich. Auch ein Unterschied zwischen den verschieden aufgelösten Temperaturmodellen konnte nicht oder nur in sehr geringer Form festgestellt werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie ein Ausblick auf Erweiterungs- und Anwendungsmöglichkeiten der vorgestellten Technik.

Die Auswertung der Ergebnisse der Streckenkorrektur entsprechen nicht den Erwartungen, welche vor Beginn der Masterarbeit formuliert wurden. Die Unterschiede zu den herkömmlichen Verfahren sind marginal. Trotzdem stellt ein Sensornetzwerk mit einem zugehörigen meteorologischen Modell ein mächtiges Werkzeug bei tachymetrischen Überwachungsmessungen dar. Damit besteht die Möglichkeit aus einer relativ geringen Anzahl von Instrumenten eine Repräsentation des gesamten Messgebiets zu berechnen. Mit Hilfe der erhaltenen Datensätze können die Einflüsse an jedem Punkt des Messgebiets exakt bestimmt werden. Dadurch kann jede Streckenmessung durch das Messgebiet zu jedem Zeitpunkt korrigiert werden.

Zur ersten Validierung des Modells wurden die Messdaten eines Monitorings am Schiffshebewerks in Niederfinow genutzt. Aufgrund der für den Test ungünstigen Lage der meteorologischen Sensoren ist es ratsam, weitere Versuche in einer realen Umgebung zur Validierung der Bibliothek durchzuführen. Dazu muss eine geeignete Anordnung der Sensoren erfolgen. Idealerweise werden die meteorologischen Einflussfaktoren dabei durch ein Sensorraster detektiert. Zur Validierung des Modells können einzelne Sensoren während der Berechnung nicht berücksichtigt werden. Die kalkulierten Daten an den entsprechenden Positionen können dann mit den realen Daten dieser Sensoren verglichen werden. Damit und den im Modell berechneten Kriging-Varianzen sind Aussagen über die Güte des Modells möglich. Des Weiteren sollten die unterschiedlichen Modelle für die Bestimmung des theoretischen Variogramms berücksichtigt werden.

Zusätzlich zur Platzierung der Sensoren und zur Wahl des Modells sollte ein Messgebiet genutzt werden, in dem unterschiedliche Böden vorkommen. Diese Bedingungen führen dazu, dass große Differenzen, vor allem im Temperaturbereich, entstehen. Zum Beispiel ist die Luft über Asphalt bei starker Sonneneinstrahlung sehr viel wärmer als bspw. über einer Rasenfläche. Dafür ist dort der Feuchtigkeitsgehalt höher. Solche Bedingungen in Kombination mit der geeigneten Anordnung der Sensoren können die Stärken und Schwächen

des Modells besser herausstellen, als die Situation in Niederfinow. Eine mögliche Konstellation zeigt die Simulation aus Kapitel 4.4.

Neben der Erfassung von Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte ist es denkbar, das Modell um weitere Einflussgrößen zu erweitern. Im ersten Schritt sollte die Sonneneinstrahlung detektiert und modelliert werden. Diese Daten können in einem Messgebiet Areale aufdecken, in denen Messungen besonders beeinflusst werden. Eine entsprechende Analyse kann bspw. Messpfeiler aufdecken, die unbedingt isoliert werden sollten, weil sie den ganzen Tag der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind. Die Punkte auf eben diesen Pfeilern weisen häufig Fehler auf, welche auf die klassische Pfeilerdrehung zurückzuführen sind. Dabei wandert der Punkt durch die Bewegung des Materials mit der Sonne. Steht ein Gerät auf diesem Pfeiler, werden diese Bewegungen auf das eigentliche Überwachungsobjekt übertragen. Damit werden dort Differenzen detektiert, die nicht da sind. Eine Isolierung der Pfeiler führt dazu, dass die Bewegung mit der Sonne geringer ausfällt und sich der entsprechende Fehler verringert. Diese Analyse kann mit einer Untersuchung der Temperaturschwankungen kombiniert werden. Dabei werden aus den modellierten Einflussfaktoren Punkte herausgefiltert, an denen die Spanne der Temperaturen sehr hoch ist. Solche Schwankungen haben ebenfalls Auswirkungen auf die Messungen. Diese sind allerdings sehr viel schwieriger zu berücksichtigen, da sie nicht konstant und meist auch mit einer gewissen Verzögerung auftreten. Aber auch hier kann eine entsprechende Isolierung der Pfeiler den Effekt und damit den Fehler minimieren.

Als weitere Anwendungsmöglichkeit kann das entwickelte Modell als Grundlage für Korrelationen dienen. Zu diesem Zweck werden die entsprechenden Größen sowie die ermittelten Bewegungen korreliert. Daraus lässt sich ableiten, welche Bewegung auf eine Änderung einer meteorologischen Einflussgröße, bspw. der Temperatur, zurückzuführen ist. Weitere Bewegungen sind auf andere Ursache zurückzuführen, welche es zu detektieren gilt. Auf Grundlage eines entsprechend großen Datenbestandes können den Temperaturunterschieden Bewegungen zugeordnet werden. Daraus lässt sich zum Beispiel ein Vorhersagemodell ableiten. Dieses kann hilfreich sein, da die Bewegungen erst mit einer gewissen Verzögerung zur Temperaturänderung auftreten. Häufig liegt dazwischen, je nach Material und anderer Faktoren, eine Zeitspanne von bis zu zwei Stunden. Somit kann nach der

Ermittlung der Temperatur vorhergesagt werden, wo sich das Überwachungsobjekt in ca. zwei Stunden befinden wird.

Die entwickelte Bibliothek ist momentan auf den sehr speziellen Anwendungsfall Niederfinow optimiert. Daraus folgt, dass alle Funktionen zum Einladen von Daten auf die Formate der beim Schiffshebewerk genutzten Sensoren beschränkt sind. Um die Kompatibilität und damit den Nutzen zu erweitern, sollte der Import mittelfristig um weitere Formate erweitert werden. Auch sollte der Zugriff auf Datenbanken implementiert werden, sodass die Datenbestände nicht extra exportiert werden müssen. Alle Operationen können dann ohne Umwege auf dem Datenbestand durchgeführt werden, ohne dass weitere Schritte, bspw. Formatierungen, notwendig sind. Zusätzlich dazu sollte ein Speichermodul entwickelt werden, sodass die berechneten Modelle ebenfalls direkt in einer entsprechenden Datenbank gespeichert werden können. Damit wird das relativ langsame Im- und Exportieren mit dem MATLAB-eigenen Format umgangen und der Zugriff auf das Modell kann wesentlich schneller erfolgen.

Das vorliegenden Modell wurde für eine zweidimensionale Abbildung des Messgebiets konzipiert. Eine zusätzliche Erweiterungsmöglichkeit ist die Integration der Höhe, um bspw. die unterschiedlichen Luftschichten besser erkennen oder die Höhe beim Modellieren des Luftdrucks besser berücksichtigen zu können. Im Rahmen einer solchen Erweiterung ist zu prüfen, inwieweit diese Funktionalität die Berechnung der Verbesserungen beeinflusst und welche neuen Anwendungsgebiete sich dadurch ergeben. Darüber hinaus ist zu überprüfen, welche Auswirkungen eine solche Erweiterung auf die benötigten Ressourcen hat.

Insgesamt eröffnet die Modellierung von meteorologischen Daten eine Reihe von Möglichkeiten, die die herkömmliche tachymetrische Überwachungsmessung um einige hilfreiche Aspekte ergänzen. Das Modell kann dabei unterstützend für die Korrektur der geodätischen Messwerte oder aber auch als eigenständiges Analysetool genutzt werden.

Literaturverzeichnis

- 1: Rainer Joeckel, Manfred Stober, Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung, Verlag Konrad Wittwer Stuttgart, 1999
 - 2: Leica, TS30_Technical_Data, , 2012
 - 3: Wilhelm Caspary, Klauf Wichmann, Auswertung von Messdaten, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2007
 - 4: Franzy Polak, Wetterlexikon - Thermometer, <http://www.wetter.net/lexikon/thermometer.html> ,03.03.2013
 - 5: th-friedrichs, Elektrisch ventiliertes Thermometer nach Frankenberger, <http://www.th-friedrichs.de/produkte/temperatur/temperaturfuehler/elektrisch-ventiliertes-thermometer-nach-frankenberger/> ,03.03.2013
 - 6: Franzy Polak, Wetterlexikon - Aspirations-Psychrometer, <http://www.wetter.net/lexikon/aspirationspsychrometer.html> ,03.03.2013
 - 7: th-friedrichs, Aspirations Psychrometer nach Assmann, <http://www.th-friedrichs.de/produkte/feuchte/relative-luftfeuchte-psychrometer/aspirations-psychrometer-nach-assmann/> ,03.03.2013
 - 8: Franzy Polak, Wetterlexikon - Barometer, <http://www.wetter.net/lexikon/barometer.html> , 03.03.2013
 - 9: PCE, Messprinzip Absolut und Differenzdruckmessung, <http://www.warensortiment.de/technische-daten/messprinzip-absolut-differenz-druckmessung.htm> ,03.03.2013
 - 10: unbekannt, Interpolation, <http://public.beuth-hochschule.de/~marganit/Interpolation.pdf> , 02.12.2012
 - 11: unbekannt, Räumliche Interpolation, http://ifgivor.uni-muenster.de/vorlesungen/Geoinformatik/kap/kap7/k07_4.htm ,02.12.2012
 - 12: ESRI, Überblick über das Toolset "Interpolation", <http://help.arcgis.com/de/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/009z00000069000000/> , 11.02.2013
 - 13: , Inverse Distance Weighting (IDW) , <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/einzel.asp?ID=-1611270911> , 11.02.2013
 - 14: , Vergleichen von Interpolationsmethoden, <http://help.arcgis.com/de/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/009z000000z4000000/> , 11.02.2013
 - 15: , Das Variogramm, http://ifgivor.uni-muenster.de/vorlesungen/Num_Modellierung/Raum_Interpol/KrigingSemiar_2_Teil.html , 13.11.2012
 - 16: esri, ArcGIS Resources, <http://resources.arcgis.com/de/help/main/10.1/index.html#/na/00q90000001t000000/> , 13.11.2012
 - 17: , Das Interpolationsverfahren Kriging , http://ifgivor.uni-muenster.de/vorlesungen/Num_Modellierung/Raum_Interpol/KrigingSemiar_3_Teil.html , 13.11.2012
 - 18: , Das neue Schiffshebewerk in Niederfinow, <http://www.schiffshebewerk-niederfinow.info/schiffh5.htm> ,15.03.2013
-

- 19: , Referenzen IVB, <http://www.ivb-vermessung.de/referenzen/> ,15.03.2013
20: Leica, Pressemitteilungen, http://www.leica-geosystems.de/de/Pressemitteilungen_19120.htm?id=2017&p=1&pagemode=print ,
15.03.2013
21: Behrendt, Modell Niederfinow, IVB, 2013

Anlage 1 – .m-Dateien der Bibliothek

Name	Input-Paramter	Output-Parameter	Beschreibung
CalcualtePPM	Temperatur Luftdruck Luftfeuchte	ppm	berechnet PPM
computeKriging	Sensordaten Sensorkoordinaten (x,y) Größe des Messgebiets	Array mit Modell und Kriging-Varianz	berechnet Modell und Kriging-Varianz
convData	Signal	gefaltetes Signal	faltet Signal mit Hilfe einer Gauß-Funktion
correctDist	Strecken Temperatur Luftdruck Luftfeuchte	korrigierte Strecken PPM	korrigiert die Strecken
DemoKorrektur	-	-	Demo für die Durchführung der Korrektur
DemoKriging	-	-	Demo für die Durchführung des Kriging
DemoSimulation	-	-	Demo für die Durchführung einer Simulation
divideDist	Strecken Stand- & Zielpunkt Auflösung	geteilte Strecken Start- & Endpunkt der Teilstrecken	teilt Strecken in vorgegebene Teile
execCalculation	-	Strecken Start- & Endpunkt der Strecken Modell Lookup-Tabelle für Zeitpunkte Beschreibung & Modus	führt Streckenkorrektur durch und speichert Ergebnis
findMoment	Position im Modell	Lookup-Tabelle des Modells Zeitpunkt der Streckenmessung	liefert Position des spezifischen Zeitpunkts im Modell
getAdjustmentTemp	Temperaturen	Koordinaten Modell	liefert Temperaturen aus Modell und Koordinaten
getDistTemp	Temperaturen	Koordinaten Modell	liefert Temperaturen zwischen zwei Koordinatenpaaren

importDist	Zeitpunkte Strecken	Pfad	Importiert Zeitpunkte und Strecken aus einer DABAMOS-Export- Datei
readAsc	Koordinate	Pfad	Importiert Koordinaten aus einer .asc-Datei
readCsv	Daten	Pfad Format Trennzeichen Anzahl Header Nutzung JavaTime	Liest .csv-Dateien unabhängig vom Trennzeichen ein

Anlage 2 – externe .m-Dateien

Name	Autor
kriging	Wolfgang Schwanghart
fminsearchbnd	John D'Errico
variogramm	Wolfgang Schwanghart
variogrammfit	Wolfgang Schwanghart
