

Entwicklung eines Systems zur Entfernungsabschätzung für Phasen basiertes UHF RFID Tracking durch Verwendung evolutionärer Berechnungsverfahren

Masterthesis eingereicht zur Erfüllung
der Anforderungen zum Erwerb des akademischen Grades
Master of Science der Medizintechnik

Erstellt von
Christoph Gnip

Fachbereich Elektrotechnik und angewandte Naturwissenschaften
Westfälische Hochschule

September 2013

Master's Thesis

Titel: Entwicklung eines Systems zur Entfernungsabschätzung für Phasen basiertes UHF RFID Tracking durch Verwendung evolutionärer Berechnungsverfahren

Title: Development of a Distance Estimation System for Phase-Based UHF RFID Tracking by Utilizing Methods of Evolutionary Computation

University: Westphalian University of Applied Sciences
Department Electrical Engineering and Applied Sciences
Neidenburger Str. 43
45897 Gelsenkirchen
Germany

In Cooperation with: Amedo Smart Tracking Solutions GmbH
Universitätstraße 142
Bochum

Author: Christoph Gnip
Luggendelle 28
48954 Gelsenkirchen
Germany

Matrikelnumber: 200720362

Supervisor: Prof. Dr. Frank Bärmann
Co-supervisor: Dipl.-Ing. Volker Trösken

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die Vorliegende Arbeit selbstständig und lediglich mit den angegebenen Hilfsmittel verfasst habe...

Dank und Anerkennung

Danke...

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Allgemein	1
1.2. Motivation	3
1.3. Mathematische Voraussetzungen	5
1.3.1. Kondition	5
1.3.2. SVD	7
1.3.3. Evolutionäre Strategien	8
1.3.4. Evolutionsstrategien - Grundlagen	8
1.3.5. Strategien mit mehreren Populationen	11
1.3.6. Optimierungsräume	11
1.3.7. Covariance Matrix Adaption - Anpassung der Kovarianzmatrix	13
1.3.8. Phase und Wellenzahl	13
1.4. Technische Voraussetzungen	14
1.4.1. Positionsgenauigkeit auf Funk basierender Verfahren	15
1.4.2. RFID	15
1.4.3. Messsystem der Amedo GmbH	18
1.5. Anforderungen	18
1.6. Ziel und Herangehensweise	18
2. Hauptteil	21
2.1. Vorüberlegung zur Komplexität	21
2.2. Entwicklung des Modells	24
2.3. Antennen Permutationen	31
2.4. Erweiterte Betrachtung der Kondition	32
2.4.1. Weitere Anwendung der Konditionszahl	33
2.5. Einsatz des Modells	34
2.6. Betrachtung der Komplexität	35
2.7. Realisierung der Kalibrierung	39
2.7.1. Implementation	39
2.7.2. Ergebnis	40
2.8. Software	49
2.8.1. Shark	49
2.8.2. Implementation	49
2.8.3. Objektfunktion in Shark	49
2.8.4. Ablaufdiagramme	53
3. Ergebnisse und Erkenntnisse	57
3.1. Ergebnisse	57

3.2. Erkenntnisse	57
4. Diskussion	61
4.1. Verbesserungen	62
4.2. Ausblick	62
5. Schluss	65
5.1. Verbesserungen	65
5.2. Ausblick	66
A. Abbildungen	67
A.1. Messaufbauten	67
B. Quellcode Auzüge	69
B.1. ObjectiveFunktion - Evolutionary Calibration Header	69
B.2. ObjectiveFunktion - Evolutionary Calibration Source	72
C. Gnuplot Skripte	73
C.1. Boxplot	73
C.2. Lineplot	77
D. Fitness Plots	81
D.1. X-Y-Ebene	81
D.2. Scatterplot	84

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Ablauf Evolutionsstrategie	9
1.2.	Zusammenhang Wellenlänge - Wellenzahl	14
1.3.	Beispiele für Transponder und Lesegeräte	16
1.5.	Messystem der Amedo GmbH	17
1.6.	Messaufbau der Amedo GmbH	17
2.1.	Profil einer Phasenmessung	21
2.2.	Reale Messwerte visualisiert	22
2.3.	Normierte Messwerte von Kalibriermessung	23
2.4.	Antennen-Szene mit einem Tag	25
2.5.	Ablauf libPermuatate	32
2.6.	Ergebnisse der Konditionsanalyse alle Permutationen	34
2.8.	Fitness Ebenen Heatmap	36
2.9.	Fitness Ebenen Heatmap, vergrößert	37
2.11.	Ablauf der Kalibrierung	41
2.12.	Ablauf der libCalibration	42
2.13.	Box-Plot der Endergebnisse der Kalibrierung	44
2.14.	Linien-Plot der Endergebnisse der Kalibrierung	45
2.15.	Kalibrierung Scatter-Plot	46
2.16.	Statistisch verteilte Ergebnisse der Kalibrierung mittels ES	47
2.17.	Visualisierung des Kalibrierendergebnis	48
2.18.	Kalibrierwerkzeuge	48
2.20.	Ablauf Programmstart	54
2.21.	Finde Modelllösung	55
2.22.	Modelllösung bestimmen	56
A.1.	PRPS-Kalibiersystem	67
A.2.	Übersicht Kalibrieraufbau	68

Tabellenverzeichnis

1.1. Anforderungen Trackingsysteme	2
1.2. Übersicht Navigationsverfahren	3
2.1. Parameter der Fitness Ebenen	37
2.2. Finale Antennen Koordinaten	40

Listings

Verwendete Abkürzungen

ES	Evolutionäre Strategie (<i>Evolutionary Strategy</i>)
CMA-ES	Covariance Matrix Adaption - Evolutionary Strategy
C++11	Programmiersprache C++ in der Version 11
MRT	Magnetresonanztomografie
RFID	Radio-Frequency Identification
LOS	Line of Sight
CSV	Comma seperated Values
Rö	Röntgen
CT	Computertomografie
EM	Elektromagnetismus
TAG	Transponder/ Receiver für Funk Kommunikation
Tracking	Positionsbestimmung
PRPS	Passiv RFID Positioning System - Produkt der amedo GmbH
TOF	Time Of Flight
PD	Phasendifferenz
RSSI	Indikator für die empfangene Signalstärke (Received Signal Strength Indication)

Verwendete Symbole

A	Matrizen werden mit fetten Großbuchstaben notiert
b	Vektoren werden mit fetten Kleinbuchstaben notiert
0	Nullvektor
<i>k</i>	ist der Index der Antennen im Aufbau verwendeten Antennen
r_k	Abstand vom Tag zur indizierten Antenne
d_{k0}	Abstand zur Landmarke (Index 0) zur indizierten Antenne
μ	Eigenwert; Es wird von dem gebräuchlicheren Symbol λ abgewichen, um Mehrdeutigkeiten im Rahmen der Arbeit zu vermeiden
(μ, λ)	"Komma"- Evolutionsstrategie
$(\mu + \lambda)$	"Plus"- Evolutionsstrategie
ϱ	Phase

1. Einleitung

Dieses Kapitel führt in die Arbeit ein. Zuerst wird allgemein auf die Technik des Trackings eingegangen und eine Übersicht über den Stand der Technik präsentiert. Anschließend wird die Motivation erläutert. Darauf folgend werden in zwei Teilen die technischen und mathematischen Voraussetzungen beschrieben, zuletzt werden daraus die Anforderungen an die Lösung abgeleitet. Zum Abschluss werden die Ziele dieser Arbeit vorgestellt. Zielgruppe dieser Arbeit sind Personen die bereits über Vorkenntnisse im den für die Arbeit wichtigen Gebieten haben. Die Ausführungen werden in der für das Verständnis dieser Arbeit angebrachten Tiefe beschrieben, sind allerdings nur oberflächlich, da die Breite der Themen zu groß ist. Allgemeine Zusammenhänge und Techniken, denen einen großer Stellenwert in dieser Arbeit zukommt, werden zusammengefasst präsentiert. Für detaillierte Beschreibungen wird stets auf entsprechende Fachliteratur verwiesen.

1.1. Allgemein

Mit der Entwicklung der minimal-invasiven Chirurgie, einer Operationsmethode bei der durch sehr kleine Einschnitte in den Körper mit besonders filigranen Operationsinstrumenten operiert wird, verändert sich die Art Operationen durchzuführen grundlegend. Eingriffe können schneller, schonender und effizienter durchgeführt werden. Möglich wird diese Entwicklung durch eine Vielzahl neuartiger technischer Systeme. Die Vorteile gegenüber herkömmlichen Operationstechniken begründen die weite Verbreitung und häufigen Einsatz der minimal-invasiven Techniken.

Mit fortschreitender Miniaturisierung der Instrumente geht die optische Kontrolle über das Operationsgebiet sowie Instrumentarium verloren. Diese Information ist unabdingbar für einen Erfolg der Operation und müssen dem Operierenden zu jeder Zeit zur Verfügung stehen. Um an diese Informationen zu gelangen ist es Stand der Technik, durch aufwändige bildgebende Verfahren intraoperativ, d.h. während der Operation, anzuwenden.

Beispielsweise werden bei kardiologischen Interventionen (z.B. Platzierung eines Stents durch die Arteria iliaca interna¹ in den Coronargefäßen des Herzens) eine permanente Lagekontrolle der Katheter mittels Röntgentechnik durchgeführt. Oder es werden Bilder durch Magnetresonanztomografie oder durch andere bildgebende Verfahren erzeugt. Nicht nur das eine Gewinnung dieser Bilddaten schwierig (MRT) oder gar schädlich (Röntgen) ist, oft muss der Patient dafür samt Instrumentarium umgelagert werden. Das Umlagern bringt weitere Risiken mit sich und

¹innere Beckenarterie- Standardzugang für diese Art von Operationen

ist mit weiterem Aufwand verbunden.

Eine Lösung für diese Problem bringen sog. Trackingsysteme. Diese Systeme sind in der Lage eine Position, z.B. eines Instrumentes, zu ermitteln und stellen die benötigten Informationen für den Arzt zur Verfügung. Die verfügbaren Systeme basieren auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien und haben dadurch unterschiedliche Vor- und Nachteile.

Die Anwendung solcher Systeme erlaubt außerdem eine softwaregestützte Planung und assistierte Durchführung der Operation. Die Kombination dieser Techniken wird Navigation genannt. Die Möglichkeit der Planung und Kontrolle macht diese Systeme im Zuge der stets steigenden Ansprüche an das Qualitätsmanagement interessant. Die Anforderungen die vom Anwender im klinischen Alltag an die Systeme gestellt werden sind:

- Gute Genauigkeit
- Hohe Verfügbarkeit
- Leichte Bedienbarkeit
- Einfache Einbindung Workflow
- Geringe Kosten
- Sicherheit

Tabelle 1.1.: Anforderungen an ein medizintechnisches Messsystem.

Die Anforderungen an ein solches System sind somit sehr hoch. Sie müssen über eine entsprechende Technik verfügen und gleichzeitig muss der Umgang mit ihnen leicht sein. Zusätzlich dürfen die Systeme möglichst wenig kosten.

Stand der Technik

Es befinden sich Trackingsysteme unterschiedlicher Hersteller am Markt. Sie beruhen auf unterschiedlichsten Messprinzipien und unterliegen den daraus resultierenden Limitierungen. Die wichtigsten Technischen Unterschiede sind im Folgenden tabellarisch zusammengefasst:

Arbeitsweise	Optisch	Magnetisch	Ultraschall	Funk (UHF)
Genauigkeit	gut	ausreichend	gut	sehr gut ²
Frequenz	mittel	hoch	gering	hoch
Volumen	mittel	klein	mittel	groß
LOS	Ja	Ja	Nein	Ja
IV ³	Nein	Nein	Nein	Ja

Tabelle 1.2.: Grobe Übersicht und Einteilung verschiedener Navigationsverfahren anhand ihres physikalischen Messprinzips.

Die Tabelle 1.2 teilt die unterschiedlichen Systeme anhand ihres physikalischen

Messprinzips ein. Herausgestellt werden vor Allem die wesentlichen Messparameter der betreffende Aspekte der Verfahren. Aus der Auflistung lassen sich Vor. und Nachteile ableiten.

Das größte Problem ist das Benötigen einer direkten Sicht auf die Objekte. Dem sog. LOS-Problem unterliegen fast alle Verfahren, die ein großes Messvolumen abdecken. Die auf Funk basierenden Verfahren haben das Problem nicht, unterliegen jedoch anderen Schwierigkeiten. Der größte Vorteil des auf Funk basierenden RFID-Verfahrens ist es verschiedene Objekte von einander zu unterscheiden, zu identifizieren.

Die Genauigkeit (im technischen Sinne: Präzision und Wiederholbarkeit) der Messung ist bei allen Verfahren mindestens ausreichend. Das allein stellt viele Techniken vor eine großer Herausforderung. Hinzukommen weitere Anforderungen, die sich aus dem Ablauf einer Intervention ergeben. Ein System muss eine einfache Integrationsmöglichkeit in den Arbeitsablauf bieten.

Im Folgenden wird auf die Besonderheiten und Merkmale des auf Funk basierenden RFID-Verfahrens eingegangen. Die anderen Verfahren werden, aufgrund der Unterschiedlichkeit der Systeme wird im Rahmen dieser Arbeit wird darauf verzichtet.

1.2. Motivation

Bestimmung der Position (im Folgenden "Tracking" genannt) mittels RFID ist eine vielversprechende Technik und konkurrierenden Verfahren in viele Punkten überlegen, vgl. 1.2. Dabei stehen zwei Unterscheidungsmerkmale heraus:

1. Es wird keine LOS benötigt
2. Separation mehrerer Objekte

Die Vorteile lassen sich auf dem zugrunde liegende physikalischen Messprinzip ableiten. Es werden elektromagnetische Signale ausgewertet, die anderen Wechselwirkungen unterliegen und in der Lage sind Materie zu durchdringen. Insbesondere im Vergleich mit optischen Verfahren ist die auf Funk basierende RFID damit überlegen. Die Eigenschaft Materie zu durchdringen erlaubt es Objekte im Patienten zu lokalisieren, entsprechende Untersuchungen über die Positionsgenauigkeit im Körper sind vielversprechend. [16]

Es können mehrere Objekte von einander unterschieden und identifiziert werden. Man kann zusätzliche Informationen auf den Objekten ablegen und abfragen. Durch das einfache Anbringen von RFID-Tags unterschiedlicher Bauarten (siehe 1.4a) nahezu jeder Gegenstand oder Person einem Tracking unterzogen werden. Dadurch wächst das Anwendungsspektrum weiter. Besonders das Auslesen von zusätzlichen Informationen ist mit keiner der anderen Technologien möglich.

Auf Funk basierende Verfahren bieten zudem ein sehr gute Ortsauflösung. Diese ist essentiell für eine genaue Positions- und Lagebestimmung von Objekten. Die Auflösung ist jedoch abhängig von dem Messprinzip und wird in Abschnitt 1.4.1 genauer beschrieben. Das von dem Messsystem der amedo GmbH verwendete Verfahren basiert auf der Messung der Phasendifferenz der Antwort eines Objekts. Aus den dort aufgeführten Gründen verwendet das PRPS der amedo GmbH eine Phasendifferenzmessung. Die Phasenlage ist direkt proportional zu einer Entfernung. Die Messung erreicht in der Theorie eine sehr gute Auflösung, sie ist jedoch nicht Eindeutig (siehe 1.4.2). Das Problem kann umgangen werden, indem man ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge auf das Messergebnis aufaddiert. Man erhält die sog. *Wellenzahl*⁴, ist diese für alle Objekte und allen Antennen bekannt kann die Postion sicher bestimmt werden.

Die Annahme, dass die Wellenzahl für alle Zeiten t bekannt ist, ist naiv und höchstens unter Laborbedingungen richtig. In der Praxis müssen hier starke Einschränkungen, aufgrund der Komplexität auf EM-basierende Verfahren, gemacht werden. Die Betrachtung der Komplexität wird in Abschnitt 2.1 und 2.6 behandelt.

Kann ein Objekt für kurze Zeit nicht erreicht werden ist sofort ersichtlich, dass die Postion nicht mehr bestimmt werden kann. Die Wellenzahl(en) muss neu ermittelt werden.

Bisherige Ansätze die Wellenzahl nach Verlust des Objektes zu ermitteln basieren auf Methoden der Statistik. Diese scheitern an der Komplexität des Problems oder sie benötigen sehr aufwändige Messreihen mit großer Anzahl an Messpunkten [2]. Das limitiert die Praxistauglichkeit solcher Methoden.

Zusammenfassend lassen sich über das Problem folgende Aussagen treffen. Das Problem ist:

1. Sehr komplex
2. Hochdimensional
3. Nicht linear (Positionsbestimmung aus EM-Wellen)

Traditionell werden Probleme dieser Klasse mit Methoden der Stochastik, Optimierung oder des maschinellen Lernens behandelt. Eine vollständige Übersicht und Abgrenzung der verschiedenen Gebiete ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich bzw. sinnvoll. Eine Übersicht findet ist in Abbildung ?? zu finden.

Ein Teilgebiet der Optimierung stellen evolutionäre Berechnungsverfahren dar. Dies sind eine Klasse von Algorithmen, die sich für komplexe Problemfälle eignen. Sie stellen kaum Forderungen an die math. Formulierung des Problems, wie z.B.

⁴Diese ist nicht identisch mit der in der Physik gebräuchlichen Wellenzahl zur Beschreibung der Eigenschaften einer Welle.

Stetigkeit etc. Daher sollte es in jedem Fall möglich sein eine Lösung über diesen Ansatz zu finden. Vorüberlegungen und Machbarkeitssstudien wurden vom Institut für Neuroinformatik (INI) an der Ruhr-Universität Bochum angestellt. [26, 19].

In dieser Arbeit soll mittels evolutionärer Verfahren das beschriebenen Problem gelöst werden. Im Endergebnis soll dabei eine Abschätzung der Entfernung zu einem Referenzpunkt möglich sein. Darüber lässt sich im Anschluss die Wellenzahl ermitteln.

1.3. Mathematische Voraussetzungen

Dieser Abschnitt behandelt die mathematischen Voraussetzungen für diese Arbeit.

1.3.1. Kondition

Gegeben ist ein lineares Gleichungssystem der Form:

$$\mathbf{Ax} - \mathbf{b} = \mathbf{0}$$

Eine numerische Lösung führt in der Regel zu einer von $\mathbf{0}$ verschiedenen Lösung (insbesondere bei überbestimmten Systemen), so das wir:

$$\mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{b} = \mathbf{r}$$

schreiben. Man nennt \mathbf{r} den Residuumvektor. Es ist offensichtlich, dass ein kleines Residuum nicht hinreichend ist um von einem kleinen relativen Fehler auszugehen. Weiter folgt aus $\mathbf{Ax} - \mathbf{b} = \mathbf{0}$ und $\mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{b} = \mathbf{r}$, dass

$$\mathbf{A}\Delta\mathbf{x} = \mathbf{r}$$

und damit: $\|\mathbf{b}\| = \|\mathbf{Ax}\| \leq \|\mathbf{A}\|\|\mathbf{x}\|$, $\|\Delta\mathbf{x}\| = \|-\mathbf{A}^{-1}\mathbf{r}\| \leq \|\mathbf{A}^{-1}\|\|\mathbf{r}\|$. Wir können nun für den relativen Fehler schreiben:

$$\frac{\|\Delta\mathbf{x}\|}{\|\mathbf{x}\|} \leq \frac{\|\mathbf{A}^{-1}\|\|\mathbf{r}\|}{\|\mathbf{b}\|/\|\mathbf{A}\|} = \|\mathbf{A}\|\|\mathbf{A}^{-1}\|\frac{\|\mathbf{r}\|}{\|\mathbf{b}\|}$$

Der Term $\|\mathbf{A}\|\|\mathbf{A}^{-1}\| := \text{cond}(\mathbf{A})$ heißt Konditionszahl. Auch der Begriff Konditionsmaß ist gebräuchlich und bezieht sich auf die gewählte Matrixnorm. Es kann gezeigt werden, dass $\text{cond}(\mathbf{A}) \gg 1$ für eine schlechte Konditionierung der Matrix steht. Wird im Folgenden von einer speziellen Matrixnorm gesprochen schreiben wir $\text{cond}(\mathbf{A})$ zu

$$\text{cond}_k(\mathbf{A}) = \|\mathbf{A}\|_k\|\mathbf{A}^{-1}\|_k$$

Der Index k wird entsprechend für die verwendete Norm ersetzt. Beispielsweise ergibt sich für die Konditionszahl der Spektralnorm⁵:

$$\text{cond}_2(\mathbf{A}) = \|\mathbf{A}\|_2\|\mathbf{A}^{-1}\|_2 = \sqrt{\frac{\mu_{\max}}{\mu_{\min}}}$$

⁵<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Spektralnorm&oldid=118988565>

Die Symbole μ_{max} und μ_{min} stehen für die Eigenwerte des Systems.

Die Konditionszahl ermöglicht eine Analyse der Güte einer Lösung, die mittels Numerischer Verfahren ermittelt wurde. Nach [12] kann man folgende Aussage über die Konditionszahl treffen:

"Wird ein lineares Gleichungssystem $Ax = b$ mit t -stelliger dezimaler Gleitpunktarithmetik gelöst und beträgt die Konditionszahl $\text{cond}(A) \approx 10^\alpha$, so sind auf Grund der im allgemeinen unvermeidbaren Fehler in den Eingabedaten A und b nur $t - \alpha - 1$ Dezimalstellen der berechneten Lösung \tilde{x} (bezogen auf die betragsgrößte Komponente) sicher."

1.3.2. SVD

Bei dem Verfahren der Singular Value Decomposition (oder auch Singulärwertzerlegung), kurz SVD, handelt es sich um eine Faktorisierung einer Matrix. Die Matrix wird dabei als Produkt von drei Matrizen dargestellt. Diese Matrizen enthalten die sog. Singulärwerte und können aus einer der Matrizen abgelesen werden. Die Eigenschaften des Systems sind, ähnlich den Eigenwerten, aus den Singulärwerten bestimbar. Besonders an der SVD ist, die Existenz für jede Form von Matrix - einschließlich nicht quadratischer Matrizen.

Die SVD basiert auf folgender Theorie der linearen Algebra: Jede $M \times N$ Matrix \mathbf{A} kann als Produkt einer $M \times N$ Spalten-orthogonalen Matrix \mathbf{U} , einer $N \times N$ Diagonalmatrix Σ mit Werten ≥ 0 und einer dritten adjungierten $N \times N$ -Matrix \mathbf{V}^* , so ergibt sich:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^* = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^T \quad (1.1)$$

Ist \mathbf{A} eine reellwertige Matrix gilt: $\mathbf{V}^* = \mathbf{V}^T$. Die Matrix Σ ist im Rahmen dieser Arbeit von besonderem Interesse, denn sie enthält die Singulärwerte σ_r . Ihre Gestalt ist wie folgt:

$$\Sigma = \left(\begin{array}{ccc|cc|c} \sigma_1 & & & & & \vdots \\ & \ddots & & & & \cdots & 0 & \cdots \\ & & \sigma_r & & & \vdots \\ \hline & \vdots & & & & \vdots \\ & \cdots & 0 & \cdots & & \cdots & 0 & \cdots \\ & \vdots & & & & & & \vdots \end{array} \right)$$

, wobei $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \cdots \geq \sigma_r > 0$

Da die σ_r der Matrix mit den Eigenwerten in Verbindung stehen, kann aus dieser Matrix die Konditionszahl bestimmt werden. Sie ist durch folgendes Verhältnis gegeben:

$$\text{cond}(\mathbf{A}) = \frac{\max(\sigma_r)}{\min(\sigma_r)} = \frac{\max(\sigma_1)}{\min(\sigma_r)} \quad (1.2)$$

Es gibt bereits viele Implementationen des Verfahrens, z.B. [21]. Diese Implementation wird durch den Erwerb der entsprechenden Lizenz im Rahmen dieser Arbeit verwendet.

Weiter Informationen zum Verfahren sind in [3, Kapitel 4.6.3] zu finden.

1.3.3. Evolutionäre Strategien

Folgende Information entstammen im Wesentlichen aus [17],[3] sowie [9] und sind auf den folgenden Seiten lediglich zusammengefasst und neu arrangiert um eine Einarbeitung in die Thematik zu ermöglichen.

1.3.4. Evolutionsstrategien - Grundlagen

Nach dem Vorbild natürlicher Evolution entworfene stochastische Optimierungsverfahren werden Evolutionsstrategie bezeichnet. Sie verwenden die Prinzipien der Mutation, Rekombination und Selektion analog zu der nat. Evolution. Der Grundlegende Ablauf dieser Strategien zeigt die Abbildung ??

Wie in der Natur auch werden Nachkommen aus der Menge der verfügbaren Eltern gebildet. Dabei bezeichnet im Folgenden:

- μ die Anzahl der Eltern (\Rightarrow Größe der Population)
- λ^6 die Anzahl der Eltern die bei Rekombination neue Kinder erzeugt; Die Anzahl der erzeugten Nachkommen einer neuen Generation
- \mathbf{x}_p Elternpunkt (Parent)
- \mathbf{x}_c Nachkomme einer Generation (Child)
- X_p^1 Die Menge aller Eltern der ersten Generation $X_p = \{\mathbf{x}_{p_1}^1, \dots, \mathbf{x}_{p_\mu}^1\}$
- X_p^k Die Menge aller Eltern der k-ten Generation $X_p = \{\mathbf{x}_{p_1}^k, \dots, \mathbf{x}_{p_\mu}^k\}$

Wir wollen nun in Abbildung 1.1 einen Blick auf den prinzipiellen Ablauf dieses Algorithmus werfen und anschließend auf die Details eingehen.

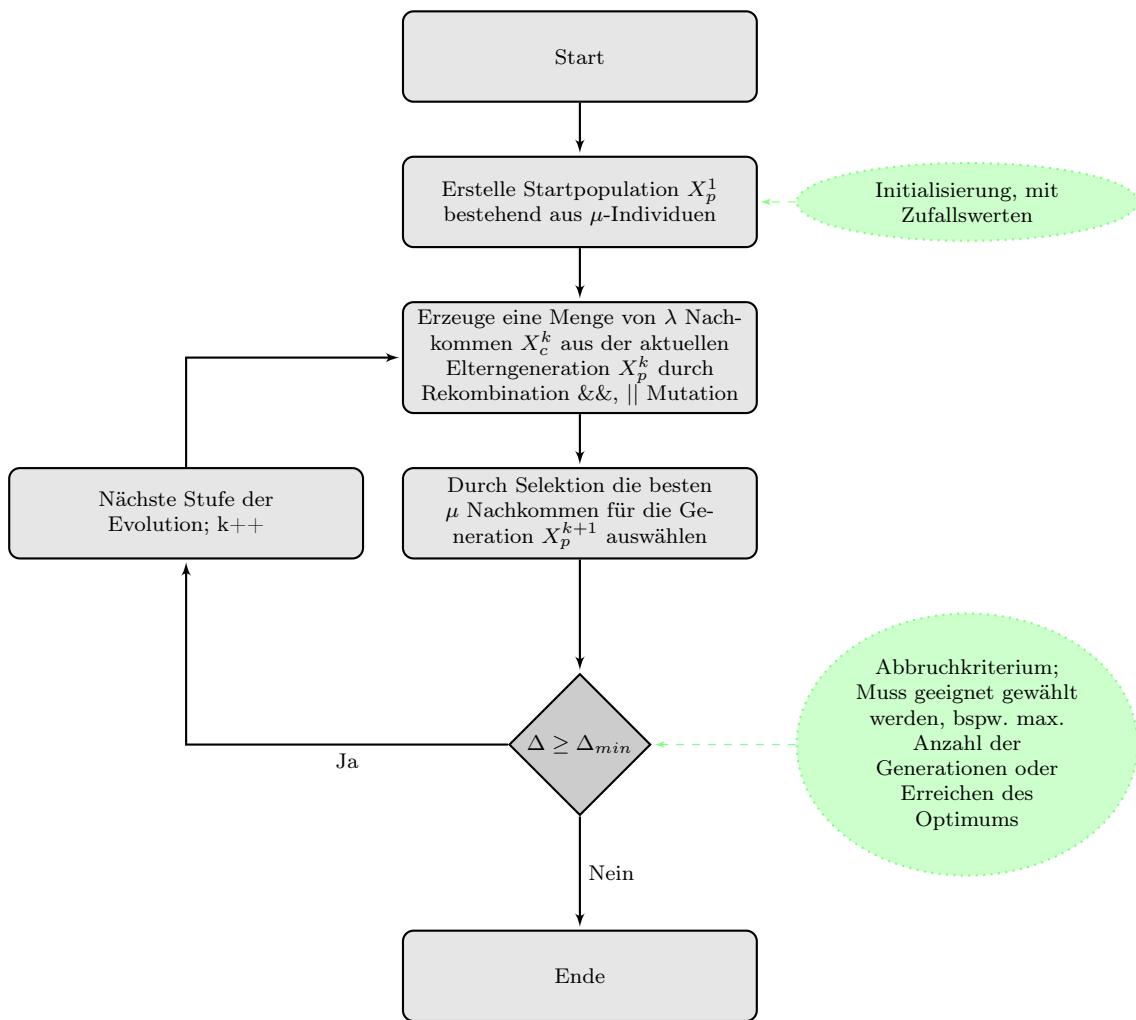
Mutation

Ein Nachkomme \mathbf{x}_C wird aus seinem Elternteil \mathbf{x}_P und einer zufälligen Variation \mathbf{d} gebildet.

$$\mathbf{x}_c = \mathbf{x}_P + \mathbf{d} \quad (1.3)$$

⁶Anmerkung: Die Verwendung des Symbols λ ist in diesem Kontext nicht eindeutig. Im Rahmen dieser Arbeit steht dieses Symbol auch für die Wellenlänge. In diesem Abschnitt wird jedoch weiterhin λ verwendet um die gleiche Nomenklatur wie bei dieser Thematik üblich zu verwenden.

Abbildung 1.1.: Der Ablauf des (λ, μ) -Evolutionsalgorithmus ist in dieser Abbildung gezeigt. Dies ist die einfachste Variante der Algorithmen⁷. Die wesentlichen Schritte gleichen sich in den Varianten.



Dabei ist \mathbf{d} ein bei jeder Mutation neu zu bestimmender $(0, \sigma^2)$ – normalverteilte Zufallszahl $Z(0, \sigma^2)$:

$$\mathbf{d} = \begin{pmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z(0, \sigma_1^2) \\ \vdots \\ Z(0, \sigma_n^2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z(0, 1)\sigma_1 \\ \vdots \\ Z(0, 1)\sigma_n \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

Die Normalverteilung der Variation ist nützlich, da kleine Änderungen wahrscheinlicher sind als große. Die maximale Größe der Variation wird durch die Standard-

abweichung σ_i bestimmt. Sie steuert somit die Schrittweite von Generation zu Generation.

Rekombination

Durch Rekombination zweier oder mehr Eltern aus der Menge aller μ -Eltern $X_\varrho \subset X_E$. Die Wahl der Eltern sollte zufällig erfolgen um Inzuchtprobleme zu verhindern.

Zwei Arten der Rekombination sind denkbar:

Die *intermediär Rekombination* erstellt einen Nachkommen durch das gewichtete Mittel von ϱ Eltern.

$$\mathbf{x}_c = \sum_{i=1}^{\varrho} \alpha_i \mathbf{x}_{p_i}, \sum_{i=1}^{\varrho} \alpha_i = 1, 2 \leq \varrho \leq \mu \quad (1.5)$$

Bei der *diskreten Rekombination* vom ϱ -Eltern wird die i -te Komponente x_{ic} eines Nachkommen \mathbf{x}_c mit der i -te Komponente eines zufällig gewählten Elternpunktes gleichgesetzt.

$$\mathbf{x}_{ic} = \mathbf{x}_{ip_j}, j \in \{1, \dots, \varrho\}, i = 1, \dots, n \quad (1.6)$$

Selektion

Die durch Rekombination und/oder Mutation erzeugten Nachkommen werden in dem Schritt Ausgewählt um einen Evolutionsfortschritt zu erreichen. Dies erfolgt anhand des Vergleichs mit dem Zielfunktionswert $f(\mathbf{x})$. Das beste Individuum oder die besten werden für die nachfolgende Generation ausgewählt. Dabei gibt es Strategien bei denen nur die Nachkommen an der Auswahl beteiligt sind und welche bei denen Eltern und Kinder teilnehmen.

Evolutionsalgorithmus

Der eigentliche Evolutionsalgorithmus ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Er enthält im wesentlichen die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Schritte. Der prinzipielle Ablauf ist für alle Evolutionsalgorithmen gleich. Eine Unterscheidung der Verfahren kann durch verschiedene Parameter beschrieben werden. Wesentlich dabei sind die Populationsgröße μ , die Anzahl an der Rekombination beteiligten Eltern ϱ , die gewählte Selektionsstrategie sowie die Anzahl der Nachkommen λ . Im Folgenden sind zuerst einige Beispiele für die Nomenklatur der Selektionsstrategie aufgeführt, die im Anschluss genauer beschrieben werden.

Für Strategien die nur auf Mutation für die Erzeugung von Nachkommen setzen sind folgende Nomenklaturen gebräuchlich:

- $(\mu + \lambda)$ Elternelemente werden in der Selektion berücksichtigt
- (μ, λ) Ausschließlich Nachkommen nehmen an der Selektion teil

Die Strategien werden Plus- bzw. Komma-Strategie genannt. bei der Plus-Strategie wird zusätzlich noch ein gewichtungsfaktor eingeführt, der das "altern" der Eltern-generation darstellt. Dieser Mechanismus soll verhindern, dass die Eltern, nach einer gewissen Anzahl an Generationen, nicht mehr berücksichtigt werden.

Wird die Rekombination eingesetzt kann auch die Anzahl der beteiligten Eltern-elemente angegeben werden:

- $(\mu/\varrho + \lambda) \& (\mu/\varrho, \lambda)$ Angabe der Anzahl beteiligter Eltern bei der Rekombination.

Mithilfe der hier beschrieben Klassifikationen werden die Algorithmen im Folgenden stets angegeben.

In Abbildung 1.1 wird der Ablauf einer Optimierung mit evolutionären Verfahren dargestellt. Es wird die Komma-Strategie gezeigt, ein Struktogramm der Plus-, oder anderer Strategien ist nicht gezeigt. Die Unterschiede würden sich in dem Punkt Rekombination zeigen.

1.3.5. Strategien mit mehreren Populationen

Es ist möglich die Strategien auf die Ebene von Populationen zu erweitern. Das bedeutet, man lässt ganze Populationen miteinander in Wettstreit treten und nur diejenige überleben, die die besten Ergebnisse liefern. Das mündet in einem zweistufigen Evolutionsprozess. Man kann die Notation um diesen Umstand erweitern und erhält so:

$$[\mu_2/\varrho_2, + \lambda_2(\mu_1/\varrho_1, + \lambda_1)]$$

Sprich aus μ_2 -Elternpopulationen werden durch Rekombination mit jeweils ϱ_2 Populationen, λ_2 Nachkommenpopulationen generiert. Innerhalb der Populationen erfolgt die Optimierung anhand einer $(\mu_1/\varrho_1 + \lambda_1)$ oder $(\mu_1/\varrho_1, \lambda_1)$ -Strategie. Nun kann nach einer bestimmten Zahl von Generationen die besten Populationen für die nächste Generation ausgewählt werden. Auch hier stehen verschiedene Auswahlkriterien zur Verfügung. Man kann z.B. die Population anhand des Zielfunktionswert des besten Individuums wählen oder den Mittelwert über alle Individuen wählen.

1.3.6. Optimierungsräume

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Kontinuierliche Optimierung

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Diskrete Optimierung

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Gemischte Optimierung

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

1.3.7. Covariance Matrix Adaption - Anpassung der Kovarianzmatrix

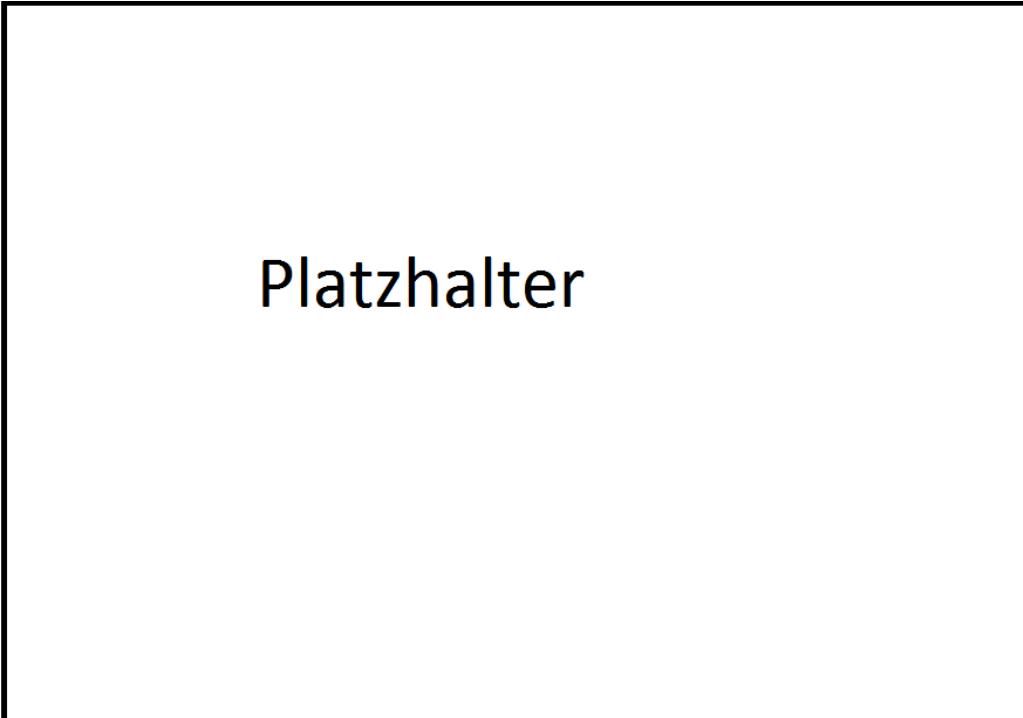
Der Folgende Abschnitt behandelt das Dieses Verfahren stellt den "State of the Art"- der Evolutionären Berechnungsverfahren dar. Für spezialisierte Probleme

gibt es bessere Lösungen, als allgemeiner Solver ist dieses Verfahren mehr als tauglich. Es wurde um die Jahrtausendwende entwickelt und veröffentlicht. Es gibt verschiedene Abwandlungen des Algorithmus und sogar eine Lösung zur Multiobjekt-Optimierung (MO-CMA-ES) existiert. [10] Das Verfahren wird aktuell stets weiterentwickelt. [REFERENZEN]

Der Algorithmus steht in verschiedene Implementationen, in unterschiedlichen Programmiersprachen und Umgebungen zur Verfügung. Teilweise sind die Implementationen Proprietär (z.B. Matlab), teilweise quelloffen. Die in dieser Arbeit zur Anwendung kommende Variante ist die Shark-Library. Diese Bibliothek ist eine in C++ geschriebene, quofoffene Software, die am Institut für Neuroinformatik der Ruhr Universität Bochum entwickelt wird. Detailliert wird Shark im Rahmen des Hauptteils in Abschnitt 2.8.1 vorgestellt.

1.3.8. Phase und Wellenzahl

Abbildung 1.2.: Dargestellt ist der Zusammenhang zwischen der Wellenlänge λ und der Wellenzahl n . Da die Phase alle 2π den gleichen Wert annimmt, wird mit dem Faktor n ein Vielfaches der Wellenlänge aufaddiert. Dadurch erhält man die Entfernung zu dem Tag.



Platzhalter

Aus der Abbildung 1.2 lässt sich folgender Zusammenhang ableiten.

$$d(\Theta, n) = \lambda(\Theta + n) \quad (1.7)$$

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

1.4. Technisch-Physikalische Voraussetzungen

In diesem Abschnitt werden die technischen und physikalischen Grundlagen für diese Arbeit vorgestellt und das Wichtigste erörtert. Es kann nicht im vollem Umfang auf die Details der Technik eingegangen werden ohne den Rahmen dieser Arbeit zu sprengen. Interessierte sei die referenzierte Literatur für eine weite Lektüre empfohlen.

1.4.1. Positionsgenauigkeit auf Funk basierender Verfahren

Die Positionsgenauigkeit eines auf EM basierenden Systems ist von dem Messprinzip abhängig. Dabei bieten sich im Wesentlichen drei Möglichkeiten:

- | | |
|--|--|
| 1. Laufzeitmessung
2. Messung der Signalstärke
3. Phasendifferenzmessung | TOA
RSSI
PD |
|--|--|

Eine Laufzeitmessung des Signals kommt aufgrund der Ausbreitungsgeschwindigkeit der EM-Welle nicht in Frage, da diese typischerweise gleich der Lichtgeschwindigkeit ist und die Distanz zwischen Sender und Empfänger zu gering ist. Das reduziert die Möglichkeiten auf zwei Verfahren. Bei der RSSI wird die Stärke des empfangenen Signals ausgewertet. Dies stellt eine einfache Art der Positionsermittlung dar. Jedoch kann die Signalstärke stark schwanken und erlaubt nur eine geringe Ortsauflösung. Bei der PD wird die Position anhand der zurückgestrahlten Welle ermittelt, genauer der Phase der Welle.

1.4.2. RFID

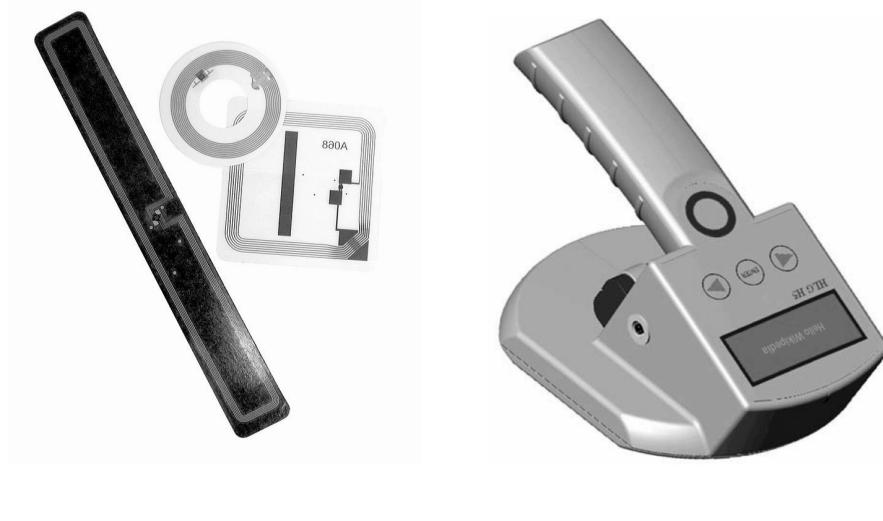
Bei *Radio-Frequency Identification* (RFID) handelt es sich um einen Funkstandard der die kontaktlose Identifikation bei gleichzeitiger Erfassung zusätzlicher Informationen ermöglicht. Zur Technik gehört ein Auslesegerät (Reader) und ein oder mehrere Transponder (Tags). Eine sehr grobe Übersicht über typische Bauformen von Tags und Reader ist in 1.3 zu finden. Heute verfügbare Transponder lassen sich auf nahezu jeder beliebigen Oberfläche anbringen lassen. Das ermöglicht ein großes Anwendungsspektrum, praktisch wird die Technik in jeder Umgebung eingesetzt in der es erforderlich oder nützlich ist, Dinge kontaktlos zu identifizieren. Eine gute Übersicht über Branchen und Anwendungsgebiete für RFID ist in [22] zu finden. Im Rahmen dieser Arbeit wird kein umfassender Überblick über die Technik geboten, da die Bauformen und Spezifikationen sehr stark variieren. Eine gute Einführung und Übersicht zur Technik ist in [5] zu finden. Dort werden auch detailliert die physikalischen Grundlagen von erläutert. Aufgrund des großen Anwendungsspektrums und der weiten Verbreitung ist die Technik in die Kritik geraten. Unter dem Dach des Vereins digitalcourage e.V. existiert die Kampagne *StopRFID*. Die Kampagne hat sich zum Thema gemacht über die Anwendungsmöglichkeiten und Gefahren von RFID aufzuklären [14]. Die Seiten der Kampagne bieten eine sehr weitgehende Auflistung der Anwendungen für RFID.

Die Messung der Position erfolgt über die Auswertung der Phasenlage des empfangenen Signals in Bezug auf ein Referenzsignal. In der EU gibt es verschiedene zulässige RFID-Frequenzen sie reichen von 865,0 MHz bis 868,0 MHz[4] (5?867,5 MHz). Man kann man die Wellenlänge mit: $\lambda \approx 0,35m$ angeben. Daraus folgt, dass alle 35 cm die gleiche Konfiguration der Phase vorliegt. Im Rahmen dieser Arbeit wird dabei von *Isophasen* gesprochen. Daraus folgt, dass die gewonnene Information aus der Phase ist nicht eindeutig ist. D.h. es lässt sich durch die Kenntnis der Phase nicht unmittelbar auf die korrekte Postion des Tags schließen. Man kann das Problem umgehen in dem man auf die errechnete Position ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge addiert. Die sog. Wellenzahl (siehe ??)).

Das System der Amedo STS verwendet eine spezielle Antennenanordnung um die Position zu ermitteln. Dabei wird eine Antennenanzahl >4 eingesetzt. Für jede dieser Antennen muss eine eigene Wellenzahl bestimmt werden. Durch Auslöschung des Signals, Absorption etc. kann es dazu kommen, dass eine Antenne eine bestimmte Zeit lang kein Signal vom Tag empfängt. Wenn die Antenne nach dieser Zeit erneut ein Signal empfängt ist die ihr zugehörige Wellenzahl unbekannt und muss neu bestimmt werden.

In realen Umgebungen treten zusätzlich noch Reflektionen und ein sog. Multipath-Effekt auf. Dabei wird das Signal nicht auf dem Direkten Weg Antenne-Tag-Antenne empfangen sondern über einen unbekannten, längeren Weg. Dadurch kommt es zu einem Fehler in der Phase. Zusätzlich ist dieser Effekt individuell für jede Antenne.

Abbildung 1.3.: Hier gezeigt sind Beispiele für Transponder und Lesegeräte. Das linke Bild zeigt drei typische Tags, nahezu jede Gestalt ist mittlerweile erhältlich. Die hier gezeigten Tags eignen sich für eine Anbringung an glatten Oberflächen. Es gibt zig weitere Bauformen, die unterschiedlichste Anwendungsspektren bedienen und sogar eine Implantation ermöglichen (nicht gezeigt). Im rechten Bild ist ein Handlesegerät gezeigt. Zum Mobilen Auslesen über mittlere bis kurze Distanzen. Auch bei den Readern gibt es unterschiedlichste Bauformen, die je nach Anwendungsfall ausgewählt werden.



(a) RFID- Transponder

(b) RFID- Handlesegerät

1.4.3. Messystem der Amedo GmbH

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut

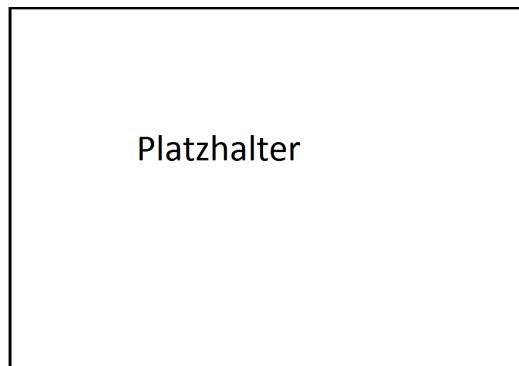


Abbildung 1.5.: Das Bild zeigt das PRPS-Messsystem zu erkennen sind die wesentlichen elektronischen Komponenten, sowie weitere periphere Hardware

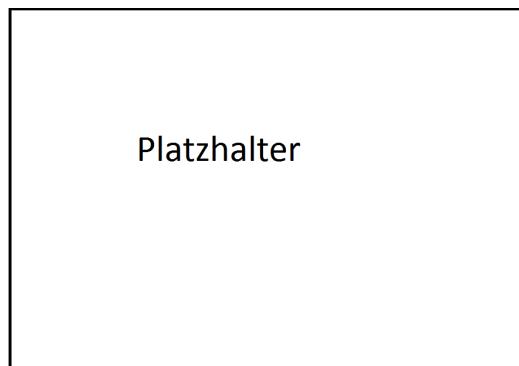


Abbildung 1.6.: Abgebildet ist der Messaufbau mit unterschiedlichen Antennen

massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

1.5. Anforderungen an die Lösung

Aus den bisher vorgestellten Überlegungen können nun folgende Anforderungen abgeleitet werden:

1. Lösung muss schnell (ideal < 1 Sekunde) gefunden werden
2. Unabhängigkeit von Stütz- und Kalibrierpunkten
3. Eindeutigkeit der Lösung
4. Eignung für ein großes Messvolumen
5. Nahtlose Integration in das bestehende Software Ökosystem
6. Stand der Softwaretechnik entsprechend

1.6. Ziel und Herangehensweise

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Systems zur Abschätzung der Position eines Tags. Das Auffinden der Lösung soll die oben abgeleiteten Anforderungen erfüllt. Die Ermittlung einer korrekten Lösung ist jedoch das Wichtigste. Das System wird im Kern die Lösung über stochastische Verfahren finden, im speziellen kommt das sog. '*Covarianz Matrix Adaption - Evolutionary Strategy*' (CMA-ES) zum Einsatz. Dazu wird zuerst ein Modell entworfen werden, dass sich für einen Einsatz in diesem Verfahren eignet. Das Modell soll mit möglichst wenig Annahmen/ Einschränkungen auskommen und dennoch ein relativ sicheres, reproduzierbares Ergebnis liefern. Weiterhin soll eine Implementation in dem Software-Ökosystem der amedo GmbH erfolgen. Dazu werden verschiedene Implementationen des Algorithmus recherchiert, verglichen und die geeignetste gewählt. Das System soll unmittelbar in den Produkten der amedo GmbH zum Einsatz kommen können, daher wird eine entsprechende Schnittstelle für andere Software implementiert werden. Darüber hinaus soll im Rahmen dieser Arbeit eine Methode entwickelt werden, um die Position von frei im Raum angeordnete Antennen zu ermitteln.

2. Hauptteil

Im Folgenden werden ausführlich die Methoden und Lösungen zur beschriebenen Problemstellung vorgestellt. Zuerst wird eine Betrachtung der Komplexität des Problems präsentiert. Es werden die Modelle vorgestellt die zum Auffinden der Lösung verwendet wurden. Im Anschluss wird die Implementation der ES und die Schnittstellen zum PRPS beschrieben.

2.1. Vorüberlegung zur Komplexität

In diesem Abschnitt wird eine Übersicht über die Komplexität des Problems gegeben. In der rechten Abbildung zu sehen ist vergrößert Visualisierung einer Kalibriermessung. Der verwendete Aufbau ist in Abbildung A.1. gezeigt. Er besteht aus vier Antennen die in einer Ebene angeordnet sind. Es wurde eine reproduzierbare Aufstellung verwendet (Abbildung A.2) und eine Fläche von 1×1 Meter vermessen. Alle 10 cm wurde eine Messung gespeichert. In der Abbildung kann man deutlich das Verhalten der Phasendaten sehen. Um diesen Verlauf deutlicher zu zeigen wurden die Phasenwerte normiert und als Oberfläche in den Plot gelegt. Am Boden gezeigt ist der Kontur-Plot der Werte. Zwischen den Werten wurde Interpoliert um die Nulldurchgänge deutlicher zu zeigen.

Die Übersicht aus der Sicht aller Antennen ist in Abbildung 2.2 gezeigt.

In der Abbildung 2.3 werden die Daten ohne Interpolation dargestellt. Es wurden die Höhenlinien eingezeichnet. Die Anordnung der Plots soll ein Gefühl dafür vermitteln, wie die Messwerte eines Tags sich an einer Stelle verhalten.

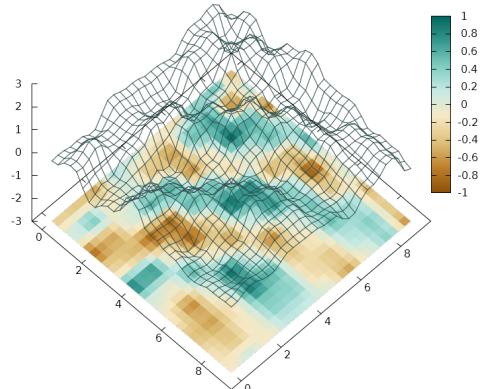
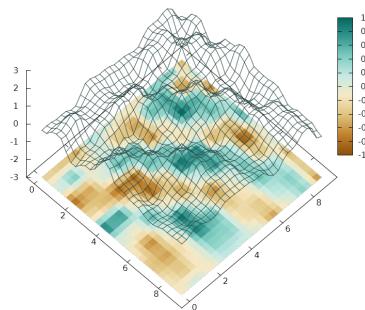
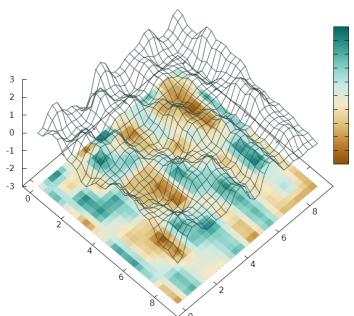


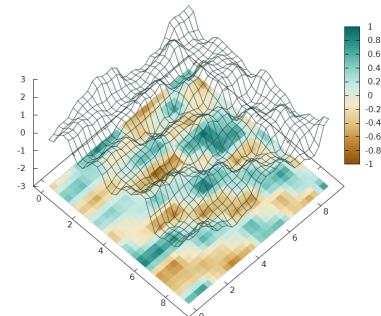
Abbildung 2.1.: Normiertes Höhenprofil einer Phasenmessung aus der Sicht von Antenne 1



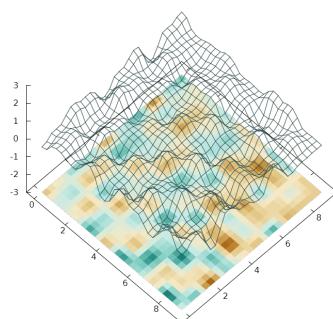
(a) Antenne 1



(b) Antenne 2



(c) Antenne 4



(d) Antenne 3

Abbildung 2.2.: Blick auf die Messwerte der Kalibrierplatte aus der "Sicht" der Antennen. Dabei zeigt sich deutlich der Wellencharakter der Messung, dieser ist zu erwarten. Die Messung würden bei einer Frequenz von 865,7 MHz unter Laborbedingungen aufgenommen.

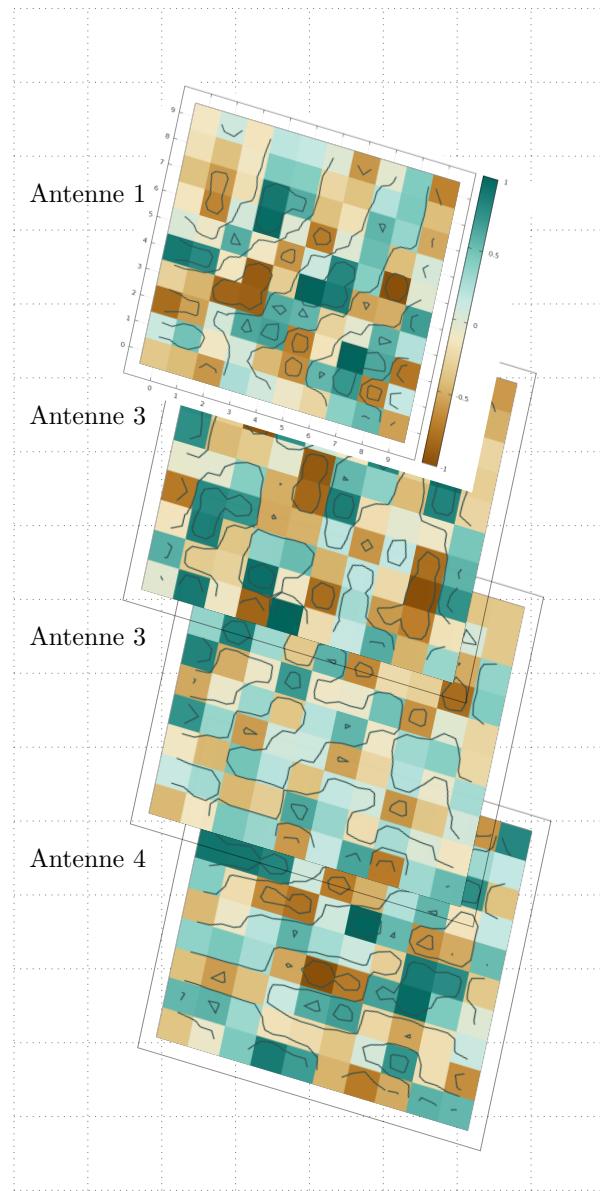


Abbildung 2.3.: Diese Grafik zeigt die Visualisierung von realen Phasen-Messwerten. Die Daten wurden durch Vermessung einer 1×1 -Kalibrierplatte mit reproduzierbarer Aufstellung gewonnen. Die Daten wurden normiert. In jeder Dimension wurden 10×10 Werte aufgenommen. Die Darstellung der Phasenwerte erfolgt als Heatmap, es soll qualitativ der Verlauf der Phasenwerte gezeigt werden. Zur Orientierung sind in jedem Plot Höhenlinien eingezeichnet. Pro Plot werden die Daten einer Antenne dargestellt. Die Antenne von der die Daten stammen ist angegeben.

2.2. Entwicklung des Modells

Im folgenden Abschnitt wird das Modell für die Lösung des Zusammenhangs entwickelt. Zur Veranschaulichung des Sachverhalts dient die Abbildung 2.4. Dort skizziert ist der Messaufbau mit einem Tag. Die Szene ist in 2D dargestellt die Ableitung des Modells erfolgt direkt für drei Raumkoordinaten. Folgende Nomenklatur und Symbole gelten für diesen Abschnitt:

- $r_k :=$ Abstand vom Tag zur Antenne
- $d_{kJ} :=$ Abstand zur Landmarke
- $N_0 :=$ Menge der verfügbaren Antennen $N = \{1, \dots, 8\}$
- $N :=$ Menge der Antennen die für die Optimierung verwendet werden können ($N \subseteq N_0$)
- $N' :=$ Menge der Antennen die für die Optimierung verwendet werden ($N' \subseteq N$)
- j ist der Index der Referenzantenne, es gilt $j = \{1, 2, \dots, 8\}$
- k ist der Index der Antennen einer Messung, es gilt $k = 1, 2, \dots, |N'| - 1$

Wir starten mit der Überlegung über den geometrischen Zusammenhang zwischen der Antennenposition von Antenne k zu der Position des Tags r_k :

$$r_k^2 = (x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + (z - z_k)^2 \quad (2.1)$$

Diese Gleichung stellt die Euklidische Vektornorm dar und entspricht der Strecke Antenne-Tag. Für die Ermittlung einer Postion (mit drei Raumkoordinaten) sind drei Antennen Notwendig. Daraus ergibt sich:

- 3 Gleichungen
- 3 Unbekannte
- Quadratisches Gleichungssystem

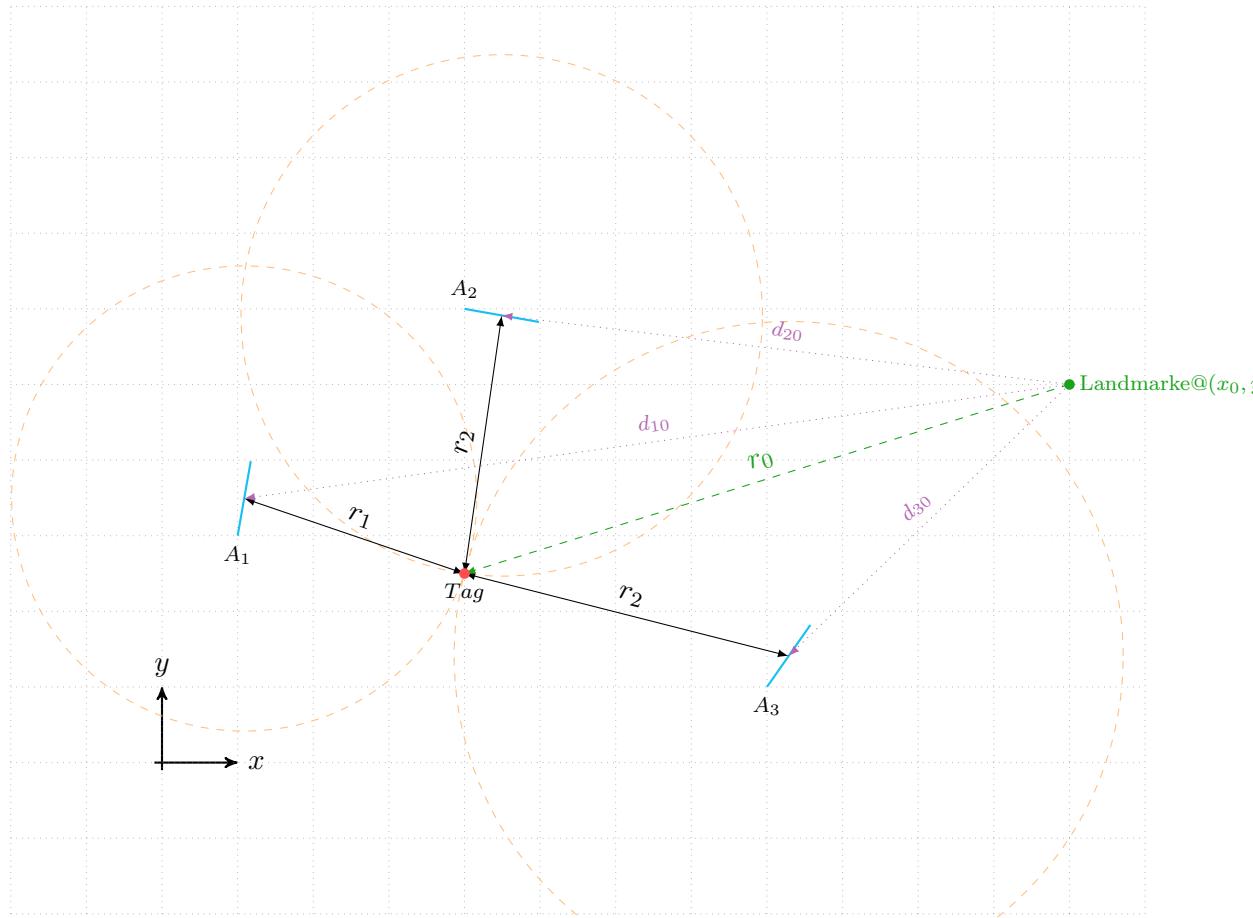
Das Gleichungssystem sieht wie folgt aus:

$$\begin{aligned} r_1^2 &= (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 \\ r_2^2 &= (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 \\ r_3^2 &= (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 \end{aligned}$$

Es ist trivial und wird in verschiedenen Beispielen gezeigt¹, dass man die Koordinaten aus dem quadratischen Gleichungssystem unmittelbar berechnen kann. Es muss jedoch ein quadratisches Gleichungssystem gelöst werden, was zu den bekannten Problematiken führt, insbesondere der Ausschluss mehrdeutiger Ergebnisse. Der Messaufbau der amedo GmbH erlaubt die Verwendung von mehr als

¹z.B. <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Trilateration&oldid=553215995>

Abbildung 2.4.: 2D-Übersicht auf die Szene mit drei Antennen, einem Tag und einer Landmarke. Die Position von $\{A_1, A_2, A_3\}$, sowie der Landmarke, zum Koordinatenursprung sind bekannt. Die Vektoren r_1, r_2, r_3 sind die gemessene Entfernung zu einer Antenne. Die Landmarke wird im späteren Verlauf eine Antenne sein, die ihrerseits ein gemessene Entfernung r_0 produziert. Der Schnittpunkt aller Kreise ist die Lösung der gemessenen Entfernung und der geom. Anordnung, die sich für die Position des Tags ergibt.



3 Messwertgebern. Diese zusätzliche Informationen lassen sich für eine Linearisierung des Gleichungssystems verwenden. Dieser Ansatz wird für ein Modell im Rahmen dieser Arbeit verwendet und wird im Folgenden beschrieben.

Von den Antennen sind die Raumkoordinaten (x, y, z – Koordinaten) bekannt, bzw. wurden durch Kalibrierung 2.7 in einem vorherigen Schritt bestimmt. Wir können zusätzlich zu notieren:

$$d_{kj}^2 = (x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2 + (z_k - z_0)^2 \quad (2.2)$$

Linearisierung des Modells. Dazu wird Gleichung 2.1 in mehreren Schritten umgebaut. Zuerst wird eine neutrale Erweiterung durchgeführt und die Terme geschickt zusammengefasst. Das führt zu:

$$\begin{aligned} r_k^2 &= (x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + (z - z_k)^2 \\ &= (x - x_k + x_0 - x_0)^2 + (y - y_k + y_0 - y_0)^2 + (z - z_k + z_0 - z_0)^2 \\ &= ((x - x_0) - (x_k - x_0))^2 + ((y - y_0) - (y_k - y_0))^2 + ((z - z_0) - (z_k - z_0))^2 \\ &= (x - x_0)^2 - 2(x - x_0)(x_k - x_0) + (x_k - x_0)^2 \underbrace{+ \dots + \dots}_{\text{y- \& z-Terme analog}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Um Platz zu sparen sind die y- und z-Terme nicht explizit notiert. Sie ergeben sich durch einfaches Ersetzen der Indizes und werden im Finalen Modell eingefügt. Durch Umstellen von (2.3) erhalten wir:

$$\begin{aligned} (x - x_0)(x_k - x_0) + \dots + \dots &= -\frac{1}{2}[r_k^2 - (x_k - x_0)^2 - (x - x_0)^2 + \dots + \dots] \\ (x - x_0)(x_k - x_0) + \dots + \dots &= \frac{1}{2}[(x_k - x_0)^2 + (x - x_0)^2 + \dots + \dots - r_k^2] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (x - x_0)(x_k - x_0) + (y - y_0)(y_k - y_0) + (z - z_0)(z_k - z_0) &= \\ \frac{1}{2}[(x_k - x_0)^2 + (x - x_0)^2 - (y_k - y_0)^2 + (y - y_0)^2 & \\ - (z_k - z_0)^2 + (z - z_0)^2 - r_k^2] \end{aligned} \quad (2.4)$$

Vergleich von (2.4) mit (2.2) bringt:

$$\begin{aligned} (x - x_0)(x_k - x_0) + (y - y_0)(y_k - y_0) + (z - z_0)(z_k - z_0) &= \\ \frac{1}{2}[\underbrace{(x_k - x_0)^2 + (z_k - z_0)^2 + (y_k - y_0)^2}_{d_{kj}^2} & \\ + \underbrace{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 - r_k^2}_{r_j^2}] \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$(x - x_0)(x_k - x_0) + (y - y_0)(y_k - y_0) + (z - z_0)(z_k - z_0) = \frac{1}{2}[d_{kj}^2 + r_j^2 - r_k^2] \quad (2.6)$$

mit

$$\mathbf{c}_{kj} = \frac{1}{2}[d_{kj}^2 + r_j^2 - r_k^2] \quad (2.7)$$

können wir das lineare Gleichungssystem abschließend schreiben:

$$\mathbf{0} = \begin{pmatrix} x_1 - x_j & y_1 - y_j & z_1 - z_j \\ x_2 - x_j & y_2 - y_j & z_2 - z_j \\ x_3 - x_j & y_3 - y_j & z_3 - z_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_j \\ y - y_j \\ z - z_j \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} c_{1j} \\ c_{2j} \\ c_{3j} \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Das Gleichungssystem entspricht ist linear und hat die allg. Form: $\mathbf{0} = \mathbf{Ax} + \mathbf{b}$ es lässt sich mit bekannten Methoden lösen.

Zusammenhang mit der Wellenzahl

Wie gezeigt wurde ergibt sich für den Fall der Trilateration und der Annahme, dass vier Antennen Messwerte liefern, die Gleichung:

$$\mathbf{0} = \begin{pmatrix} x_k - x_0 & y_k - y_0 & z_k - z_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} c_{kj} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Wir stellen fest, dass dieses Modell rein geometrisch ist. Es erlaubt bereits einen Einsatz im Rahmen der Kalibrierung (siehe 2.7). Es wird im Folgenden eine Erweiterung dieses Modells gezeigt. Ziel ist es, einen Zusammenhang zwischen diesem Modell, der gemessenen Phase und der Wellenzahl zu erzeugen. Folgender Ansatz wird gewählt:

$$r(\varrho, n) = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{\varrho}{2\pi} + n \right), \lambda = \frac{c}{f}, n := \text{Wellenzahl} \quad (2.10)$$

In dem Modell steht ϱ_k für die gemessene Phase vom Messsystem und n_k ist die gesuchte Wellenzahl. Der Index k deutet eine Existenz der beiden Parameter für jede Antenne an. Durch einsetzen von (2.10) in (2.7), erhalten wir:

$$c_{kj}(\varrho_0, \varrho_k, n_0, n_k) = \frac{1}{2} \left[d_{kj}^2 + \frac{\lambda^2}{4} \left(\frac{\varrho_j}{2\pi} + n_0 \right)^2 - \frac{\lambda^2}{4} \left(\frac{\varrho_k}{2\pi} + n_k \right)^2 \right] \quad (2.11)$$

Wir stellen Gleichung (2.11) um:

$$\begin{aligned} c_{kj}(\varrho_0, \varrho_k, n_0, n_k) &= \frac{1}{2} \left\{ d_{kj}^2 + \frac{\lambda^2}{4} \left[\left(\frac{\varrho_j}{2\pi} \right)^2 + 2 \frac{\varrho_j}{2\pi} n_0 + n_0^2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \left(\frac{\varrho_k}{2\pi} \right)^2 - 2 \frac{\varrho_k}{2\pi} n_k - n_k^2 \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} \left\{ d_{kj}^2 + \frac{\lambda^2}{4} \left[\left(\frac{\varrho_j}{2\pi} \right)^2 - \left(\frac{\varrho_k}{2\pi} \right)^2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 2 \frac{\varrho_j}{2\pi} n_0 - 2 \frac{\varrho_k}{2\pi} n_k + n_0^2 - n_k^2 \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} d_{kj}^2 + \frac{\lambda^2}{8} \left[\frac{1}{(2\pi)^2} (\varrho_0^2 - \varrho_k^2) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\pi} (\varrho_0 n_0 - \varrho_k n_k) + (n_0^2 - n_k^2) \right] \end{aligned} \quad (2.14)$$

Führen wir nun:

$$\begin{aligned} a_{0k} &:= \frac{1}{2} d_{kj}^2 \\ a_1 &:= \frac{\lambda^2}{8} \\ a_2 &:= a_1 \frac{1}{\pi} \\ a_{3kj} &:= a_1 \frac{1}{(2\pi)^2} (\varrho_j^2 - \varrho_k^2) \end{aligned}$$

in Gleichung (2.14) ein, erhalten die finale Form der Gleichung:

$$c_{kj}(\varrho_0, \varrho_k, n_0, n_k) = a_{0k} + a_1(n_0^2 - n_k^2) + a_2(\varrho_0 n_0 - \varrho_k n_k) - a_{3kj} \quad (2.15)$$

Die Einführung der Konstanten macht zum Einen die Gleichung übersichtlicher. Zum Anderen können so in der spätere Softwareimplementation, Rechenschritte gespart werden. Was sich günstig auf den Rechenaufwand auswirkt. Im Weiteren erkennt man, dass in Gleichung (2.15), für $\varrho_k = \text{const.}$ & $\varrho_0 = \text{const.}$ gilt. Der Grund dafür liegt darin, dass ϱ zwar die Messwerte beschreibt, diese jedoch nur in dem Modell eingeführt werden. Im Sinne der später durchgeföhrten Optimierung sind diese Parameter keine Variablen. Es ermöglicht uns zu schreiben:

$$c_{kj}(\varrho_0, \varrho_k, n_0, n_k) = c_{kj}(n_0, n_k) \quad (2.16)$$

Im engeren Sinne einer mathematischen Funktion sollten wir die Parameter alle als Argument aufnehmen. Diese Form soll darstellen, welche Größen von Interesse sind. Im späteren Gebrauch wird diese Gleichung in der Optimierung eingesetzt werden.

Für unser Gleichungssystem aus(2.9) ergibt sich:

$$\mathbf{0} = \left(\begin{array}{ccc} x_k - x_0 & y_k - y_0 & z_k - z_0 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} c_{kj}(n_0, n_k) \end{array} \right) \quad (2.17)$$

Konkretes Beispiel

Für ein konkretes Beispiel Betrachten wir nun (2.17). Dabei wählen wir $|N'| = 4$ (d.h. wir verwenden 4 Antennen) und setzen $j = 0$. Diese exemplarische Konfiguration kann wie folgt beschrieben werden: Antenne 0 ist die Referenz-Antenne und Antennen 1, 2 und 3 sind Messwertgeber für die Phaseninformation. Im praktischen Gebrauch werden die Konfigurationen anders zusammengestellt. Strategien für die Zusammenstellung werden später beschrieben.

Für die gewählte Konfiguration ergibt sich explizit:

$$\mathbf{0} = \underbrace{\left(\begin{array}{ccc} x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \\ x_3 - x_0 & y_3 - y_0 & z_3 - z_0 \end{array} \right)}_{\mathbf{A}} \underbrace{\left(\begin{array}{c} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{array} \right)}_{\mathbf{x}} - \underbrace{\left(\begin{array}{c} c_{10}(n_0, n_1) \\ c_{20}(n_0, n_2) \\ c_{30}(n_0, n_3) \end{array} \right)}_{\mathbf{b}} \quad (2.18)$$

Wir wollen den Vektor \mathbf{b} nun explizit betrachten:

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} a_{01} + a_1(n_0^2 - n_1^2) + a_2(\varrho_0 n_0 - \varrho_1 n_1) - a_{310} \\ a_{02} + a_1(n_0^2 - n_2^2) + a_2(\varrho_0 n_0 - \varrho_2 n_2) - a_{320} \\ a_{03} + a_1(n_0^2 - n_3^2) + a_2(\varrho_0 n_0 - \varrho_3 n_3) - a_{330} \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Das Ergebnis ist ein um ϱ und n erweitertes Gleichungssystem. Zusätzlich enthält es mehrere geometrische Konstanten (a_{0k}), mehrere Phasen-Konstanten (a_{3k0}), sowie zwei Systemparameter abhängige Konstanten (a_1 und a_2). Allgemeiner formuliert ergibt sich:

$$0 = \begin{pmatrix} x_k - x_0 & y_k - y_0 & z_k - z_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{pmatrix} - \left(a_{0k} + a_1(n_0^2 - n_k^2) + a_2(\varrho_0 k_0 - \varrho_k n_k) - a_{3kj} \right) \quad (2.20)$$

Hinzufügen von Antennen - Der allgemeine Fall

Aus den oben beschriebenen Beispiel, Gleichung (2.20), und die dort getroffene Wahl von $|N'| = 4$ ergibt sich wie viele Veränderliche sich für eine gewählte Konstellation an Antennen ergeben. Leiten wir daraus nun einen allgemeinen Fall ab. Für k gilt in diesem Fall $k = \{1, \dots, N' - 1\}$, wir wählen die Referenzantenne $j = 0$ und die Menge an Verwendeten Antennen gleich der Anzahl der Verfügbaren $N' = N$. Es ist leicht ersichtlich, dass sich die Anzahl der verwendeten Antenne unmittelbar auf die Zahl der Variablen auswirkt. Es ergibt sich für das Modell mit vier Antennen insgesamt 7 Variablen $(\mathbf{x}, n_0, n_1, n_2, n_3)$, wobei sich für ein Modell mit allen 8 Antennen, 11 Variablen $(\mathbf{x}, n_0, \dots, n_7)$ ergeben. Andere Konfigurationen verhalten sich analog dazu.

Relevanz dieses Modells

Dieses Modell hat unmittelbare Relevanz für die Praxis. Es trägt dem Umstand Rechnung, dass zu einem Messzeitpunkt ein Teil der Antennen keine Messwerte liefern könnte. Das Modell erlaubt daher, dass die Anzahl und die Auswahl der Antennen variieren kann. Damit ist das Modell uneingeschränkt tauglich für den Einsatz in dem PRPS-Messsystem.

Abschließend soll das das bisher verwendete Modell umgeschrieben werden, damit die Allgemeingültigkeit darin enthalten ist.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} x_k - x_0 & y_k - y_0 & z_k - z_0 & \sum_{i=1,j=0}^k (-a_1 \delta_{ij}) & -a_2 \Theta_0 & \sum_{i=1,j=0}^k (a_2 \Theta_i \delta_{ij}) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \\ n_0^2 - n_k^2 \\ n_0 \\ n_k \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{b} = a_{0k} - a_{3kj} = c'_{kj}$$

Dabei steht δ_{ij} für den bekannten Kronecker-Operator und bedeutet:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{für } i = j \\ 0 & \text{für } i \neq j \end{cases}$$

Im Expliziten sehen die Matrix \mathbf{A} und der Vektor \mathbf{b} , für denn Fall $N' = 3$ und $k = \{1, 2, 3\}$, wie folgt aus:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 & -a_1 & 0 & 0 & -a_2\Theta_0 & a_2\Theta_3 & 0 & 0 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 & 0 & -a_1 & 0 & -a_2\Theta_0 & 0 & a_2\Theta_3 & 0 \\ x_3 - x_0 & y_3 - y_0 & z_3 - z_0 & 0 & 0 & -a_1 & -a_2\Theta_0 & 0 & 0 & a_2\Theta_3 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \\ n_0^2 - n_1^2 \\ (\dots) \\ n_0^2 - n_3^2 \\ n_0 \\ n_1 \\ (\dots) \\ n_3 \end{pmatrix}$$

Bemerkungen - Finales Modell

Das Ergebnis ist eine 3×10 Matrix und ein 1×10 Vektor. Es ist möglich diesem Modell eine beliebige Anzahl an Antennen hinzuzufügen. Fügt man eine Antenne zur Berechnung hinzufügen würde sich die Matrix \mathbf{A} um zwei Spalten und eine Zeile erweitern, der Vektor \mathbf{x} analog um 2 Zeilen.

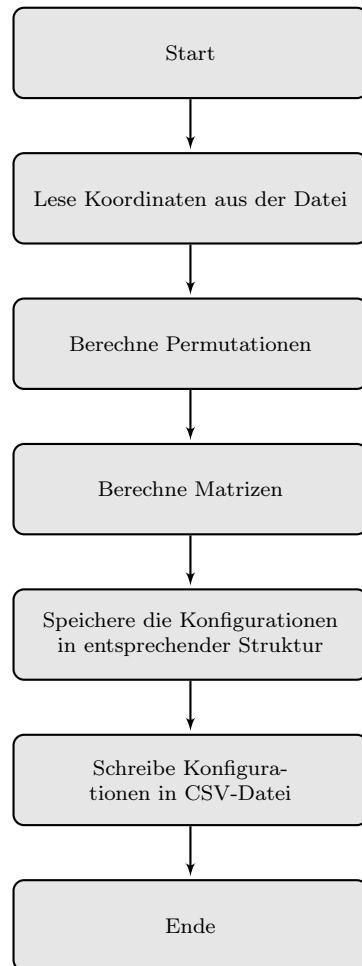
2.3. Antennen Permutationen

Um die Beurteilung der Konditionszahl der Matrizen effizient durchführen zu können, wurde in dieser Woche ein Tool geschrieben. Es erstellt automatisch, auf Basis der durch die Kalibrierung bestimmten Koordinaten, alle möglichen Permutationen von Antennen. Die sich ergebenen Matrizen sind immer auf eine Referenzantenne bezogen. Es ergeben sich, bezogen auf eine Referenzantenne, folgende Anzahl an Matrizen:

$$\frac{7!}{3!(7-3)!} = 35 \quad (2.21)$$

Die sich ergebenen Matrizen sind immer auf eine Referenzantenne bezogen. Es ergeben sich für eine Referenzantenne folgende Anzahl an Matrizen: Für einen Aufbau mit acht Antennen ergeben sich so $8 \times 35 = 280$ mögliche Anordnungen. Die Implementation der Berechnungen der Permutationen findet sich in dem Modul 'libPermute'. Das Modul generiert bei der Instanziierung automatisch alle

Abbildung 2.5.: lorem



möglichen Kombinationen von Antennen und speichert diese in einer geeigneten Struktur für den späteren Gebrauch. Das Ablaufdiagramm ist in Abbildung 2.5 zu finden.

2.4. Erweiterte Betrachtung der Kondition

Die vorgestellte erweiterte Form des Modells erleichtert Implementation und Verifikation, da große Teile vorberechnet und in geeigneten Strukturen abgelegt werden können. Diese statischen Teile des Modells sind in Gleichung 2.22 ersichtlich. Es sind nun auch die gemessenen Phasenwerte Teil des Modells, genauer: der Matrix \mathbf{A} . Im Folgenden werden die Auswirkungen auf die Kondition der Matrix betrachtet,

wenn man diese Phasendaten hinzurechnet. Weiterhin wird Untersucht inwieweit die Zerlegung in Blockmatrizen und die Untersuchung der Kondition dieser eine Abschätzung der vollständigen Konditionszahl im Allgemeinen darstellt.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{Z} & \mathbf{P} & \mathbf{V} \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Dabei ist:

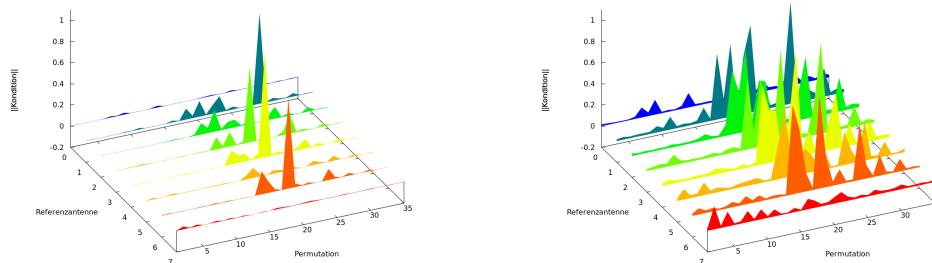
$$\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \quad \mathbf{P} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \quad \mathbf{V} \in \mathbb{R}^{4 \times 3} \quad (2.23)$$

Die Matrizen \mathbf{Z} und \mathbf{P} sind statisch. Hingegen enthält die Matrix \mathbf{V} die gemessenen Phasenwerte Θ_k der Antennen für diese Konfiguration.

Die Abbildung 2.6 zeigt die bereits angestellte Untersuchung zu dieser Überlegung. Abbildung 2.7a stellt die Konditionszahl der rein geometrischen 3×3 -Matrix dar. In der Abbildung 2.7b sehen wir die Kondition der erweiterten Matrix. Neben der geometrischen sind auch die beiden anderen Blockmatrizen in diese Konditionsbe- trachtung eingeflossen. Als zusätzliche Angabe wird ist sind die Skalierungsfakto- ren angegeben. Legt man beide Grafiken übereinander erkennt man:

1. Geometrisch gut konditionierte Konfigurationen (linke Grafik), bleiben im erweiterten Modell (rechte Grafik) weiterhin gut konditioniert.
2. Die Konditionszahl der *schlechteste* ist wesentlich kleiner (ca. Faktor 10) als im rein geometrischen Modell

Abbildung 2.6.: Analyse der Konditionszahlen aller möglichen Matrizen für den Messaufbau; Die Konditionszahl ist für jede mögliche Permutation an Messantennen für eine Referenzantenne angegeben



(a) Konditionszahl der rein geometrischen 3×3 Matrix normiert auf den größten vorkommenden Wert (= 2149, 16). Auf den Achsen finden sich der Index der Referenzantenne sowie die Nummer der Permutation. Die z-Achse enthält die normierte Kondition

(b) Konditionszahl der 10×3 Matrix normiert auf den größten vorkom- menden Wert (= 257, 13); In dieser Konfiguration sind die Konstanten (a_1 & a_2) sowie die variablen, gemes- senen Phasen Θ_k enthalten

Aus der Grafik lässt sich entnehmen, dass es für jede Referenzantenne aus der Geometrie alleine gute Konfigurationen existieren. Aus diesen Erkenntnissen kann in späteren Aufbauten, die Position der Antennen optimiert werden. Diese Verfahren wird in Abschnitt 5.2 weiter beschrieben. Die Grafik lässt erkennen, dass eine Konfiguration die ohne Phasendaten eine gut Kondition aufwies, eine ähnliche Kondition behält wenn diese Daten in der Modell einfließen.

2.4.1. Weitere Anwendung der Konditionszahl

Weitere Anwendungen, die sich aus der Konditionszahl der Matrix ableiten, sind denkbar. Für die FPGA-Software ist, parallel zu diesem Projekt, eine intelligente Umschaltung der Antennen in der Planung. Die Kondition der geometrische Matrix verändert sich nach dem Kalibrieren nicht mehr. Dadurch und durch die oben beschriebenen Überlegungen kann statisch eine Abschätzung für die Konditionszahl, von zwei der drei Blockmatrizen, im Vorfeld erstellt werden. Die Konditionszahl dient zum Steuern der Umschaltung. Ordnet man die möglichen Konfiguration anhand ihrer Konditionszahl (niedrigste zuerst) in einer statischen Liste an so kann im FPGA eine einfache, schlaue Umschaltung implementiert werden. Diese würde immer dafür sorgen, dass Messdaten von einer Konfiguration bevorzugt werden, die eine niedrige Konditionszahl hat und somit relativ sicher zu einer guten Lösung führen. Diese Überlegungen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht näher beschrieben.

Eine Weitere Anwendung ergibt sich für die Kalibrierung. Der Aufbau der Antennen kann unter Berücksichtigung der Kondition optimiert werden. Ziel der Optimierung wäre es durch eine geeignete Positionierung der Antennen, die Anzahl der Antennenpermutationen mit kleiner Konditionszahl zu maximieren.

2.5. Einsatz des Modells

Im vorherigen Abschnitt wurde das Modell aus den geometrischen Gegebenheiten hergeleitet. Das Model ist in seinen Eingabeparametern Flexibel und erlaubt verschiedene Arten des Einsatzes. Diese werden im Folgenden erläutert.

2.6. Betrachtung der Komplexität

Im Folgenden wird eine Betrachtung der Komplexität des in Abschnitt 2.2 entwickelten Modells präsentiert. Diese Betrachtung ist wichtig für die Parametrisierung des Optimierungsverfahrens sowie für eine Beurteilung der Generellen Lösbarkeit mit den verwendeten Verfahren. Es wird eine Visualisierung des Fitness-Raums vorgestellt und im Vergleich mit sog. Benchmark-Funktionen diskutiert.

Für die Erstellung der Fitness-Ebenen wurde ein Programmteil (der *FitnessPlaneCalculator*) entwickelt, der ein Modell mit vorgegebenen Daten füttert und den Rückgabewert in eine Datei schreibt. Das Programm lässt sich per Eingabedatei steuern und erlaubt die Definition der Ebenen die dargestellt werden sollen.

Es lassen sich immer zwei Variablen der Objektfunktion variieren und der Rest wird dabei auf feste Werte gesetzt. Das Erlaubt eine Visualisierung durch eine 2D-Heatmap (siehe folgende Plots). Aus der Visualisierung können Rückschlüsse auf die Gestalt der Fitnessebene gezogen werden.

Die Parameter wurde für diese Plots so gewählt, dass sie über den Bereich indem die richtige Lösung liegen sollte, iterieren. Da nur drei Parameter Variiert werden, wurden die übrigen vier auf passende Werte gesetzt. Diese konnten analytisch bestimmt werden und sind in Tabelle 2.1 zusammen mit den wahren Werten aufgeführt.

Abbildung 2.8.: Diese Grafik stellt die Fitnessebenen des Problems dar. Gezeigt ist das Problem für eine Anordnung aus vier Antennen und einem Sweep über die $x - y$ -Ebene. Jeder Plot ist für einen festen Wert z erstellt worden. Die x, y -Werte wurden über ein Intervall von $[-20, 20]$ mit einem Inkrement von 0.5 variiert, das ergibt eine für die Abschätzung der Gestalt der Fitnessebene ausreichende Datengrundlage. Die z -Werte der 16-Plots stammen aus dem Intervall $[-7, 8]$ mit einem Inkrement von 1. Bereits in dieser Ansicht, ist zu erkennen, dass der Verlauf sehr flach ist. Eine Schlucht bildet sich etwa in Nord-Süd-Richtung aus. Jeweils verzeinet ist das lokale Minima (+) eins Plots, sowie die Höhenlinien. Die farbliche Kodierung gibt den Fitnesswert an diesem Punkt an. Die Fitnesswerte wurden normiert und um den Wert ihres Minimums verschoben.

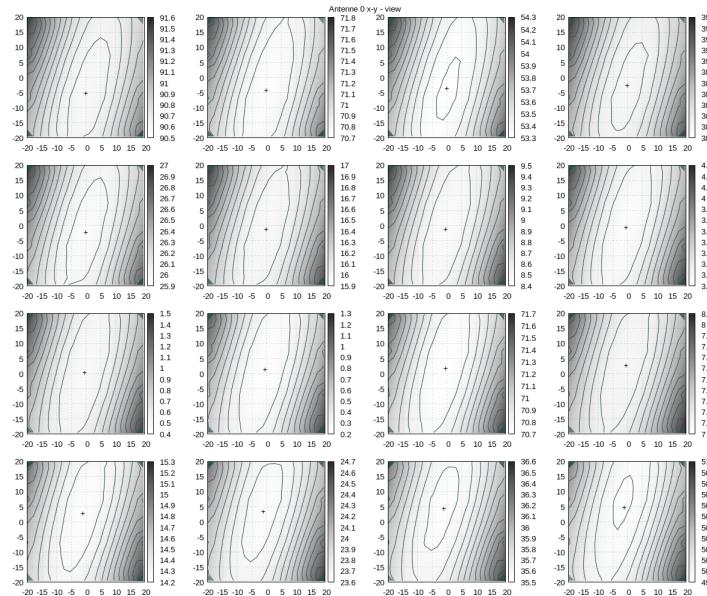
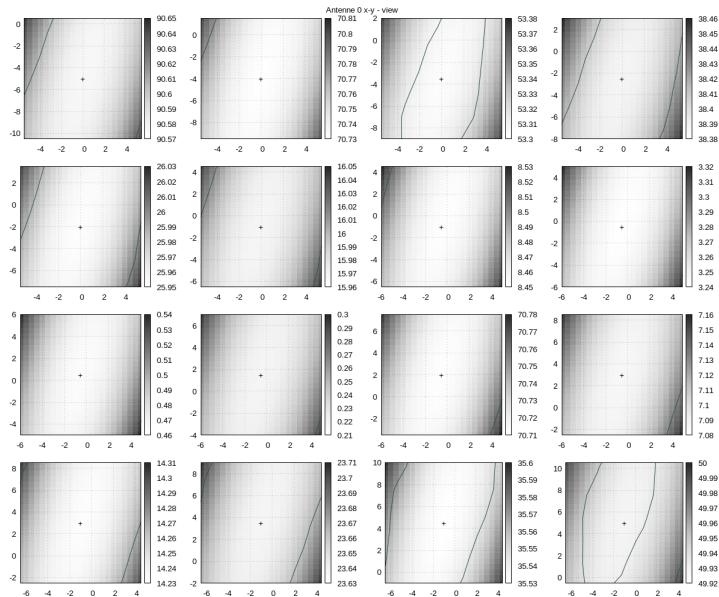
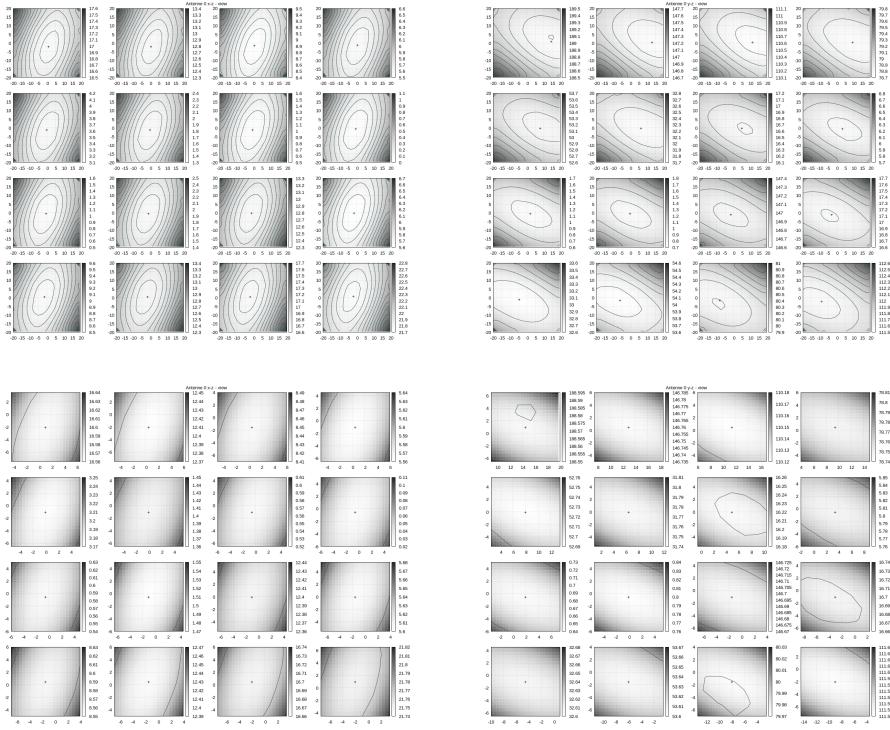


Abbildung 2.9.: Vergrößerung der Fitnessebenen der Antenne 1. Es ist hier deutlich zu erkennen, wie gering die Funktionen ansteigen. Das ist ein Problem für die meisten Algorithmen. Es bleibt zu klären wie sensitiv der Algorithmus auf diesen Umstand reagiert. Es wurde um das lokale Minima zentriert und der Bereich auf



Aus den Abbildungen 2.8 und 2.9 zeigen sich die ersten Probleme für den Algorithmus. Eine große, sehr flache Fitnessebene für verschiedene Parameter ist nicht leicht zu handhaben. Aus dieser Untersuchung geht bereits hervor, dass die Anzahl an Nachkommen groß sein muss. Auch darf die Schrittweite σ nicht zu klein werden, damit die Lösung nicht auf der flachen Ebene liegen bleibt. Ein Ähnliches Verhalten zeigt sich bei den anderen Antennen und anderen Ebenen. Aufgrund der Komplexität des in dieser Arbeit erstellten Modells 2.3 ist bereits dieser Fall recht hochdimensional. Er erreicht 7 Dimensionen und es kann im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig untersucht werden. Die Fitness-Plots aller Antennen und für drei Ebenen sind in Anhang ?? zu finden.



Ebene	x	y	z	n_0	n_1	n_2	n_3
x-y	[-20:.5:20]	[-20:.5:20]	[-7:1:8]	[7:0:7]	[10:0:10]	[13:0:13]	[9:0:9]
x-z	[-20:.5:20]	[-7:1:8]	[-20:.5:20]	[7:0:7]	[10:0:10]	[13:0:13]	[9:0:9]
y-z	[-7:1:8]	[-20:.5:20]	[-20:.5:20]	[7:0:7]	[10:0:10]	[13:0:13]	[9:0:9]
Wahre	0.479	-1.012	0.607	7	10	13	9

Tabelle 2.1.: Tabellarisch sind hier die Parameter (Intervalle) der Fitness Ebenen aufgelistet. Zusätzlich sind die Werte angegeben, in denen eine optimale Lösung liegen sollte.

2.7. Realisierung der Kalibrierung

In diesem Abschnitt wird die Implementierung der Kalibrierung des Messaufbaus und kurz die Ergebnisse zusammengefasst. Es werden zwei unterschiedliche Berechnungsverfahren vorgestellt. Zuerst die Berechnung über das SVD-Verfahren, danach durch das CMA-ES-Verfahren. Es ist sinnvoll zu erwarten, dass beide Ergebnisse die gleichen Koordinaten liefern.

2.7.1. Implementation

Der Ablauf der Kalibrierung ist in Abbildung 2.11 in Form eines Ablaufdiagramms dargestellt. Beschrieben werden die wesentlichen Schritte. Es sind sowohl Interaktion mit der Person enthalten die die Kalibrierung durchführt, als auch die Schritte

te die von den beteiligten Softwarekomponenten ausgeführt werden enthalten. Es wurden im Rahmen der Arbeit zwei unterschiedliche Wege implementiert, um ein Ergebnis für die Kalibrierung zu berechnen. Diese Wege werden im Folgenden vorgestellt und die Ergebnisse miteinander verglichen.

Die Präsentation der Resultate wird vor Allem dazu verwendet werden die gewählte Form der Diagramme zu erläutern. Diese werden in den Ergebnissen des komplexeren Modells ebenfalls verwendet.

SVD

Das unter 1.3.2 vorgestellte Verfahren der Singular-Value-Decomposition kann dazu verwendet werden eine Lösung eines linearen Gleichungssystems zu berechnen. Das Modell, dass zur Kalibrierung verwendet wird, ist ein Gleichungssystem der Form $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ und hat drei Gleichungen mit drei Unbekannten. Daher kann sofort eine Lösung mit dem Verfahren hergeleitet werden. Das Ergebnis eines Messaufbaus mit 3 Antennen ist in Tabelle 2.2 und in Abbildung 2.17 gezeigt. Die Implementation des Algorithmus stammt aus [21] und wurde für diese Arbeit angekauft.

CMA-ES

Das über den evolutionären Algorithmus gefundene Ergebnis gleicht dem des SVD-Verfahrens. Der SVD-Algorithmus ist um ein Vielfaches effizienter² beim Lösen des Gleichungssystems. Der Gründe warum an dieser Stelle das Ergebnis dennoch über evolutionäre Verfahren dargestellt wird sind folgende:

1. Die Komplexität ist gering, daher kann der Ablauf des evolutionären Verfahrens besser dargestellt und verstanden werden
2. Der Vergleich der beiden Ergebnisse ermöglicht die Verifizierung der Implementation beider Verfahren.

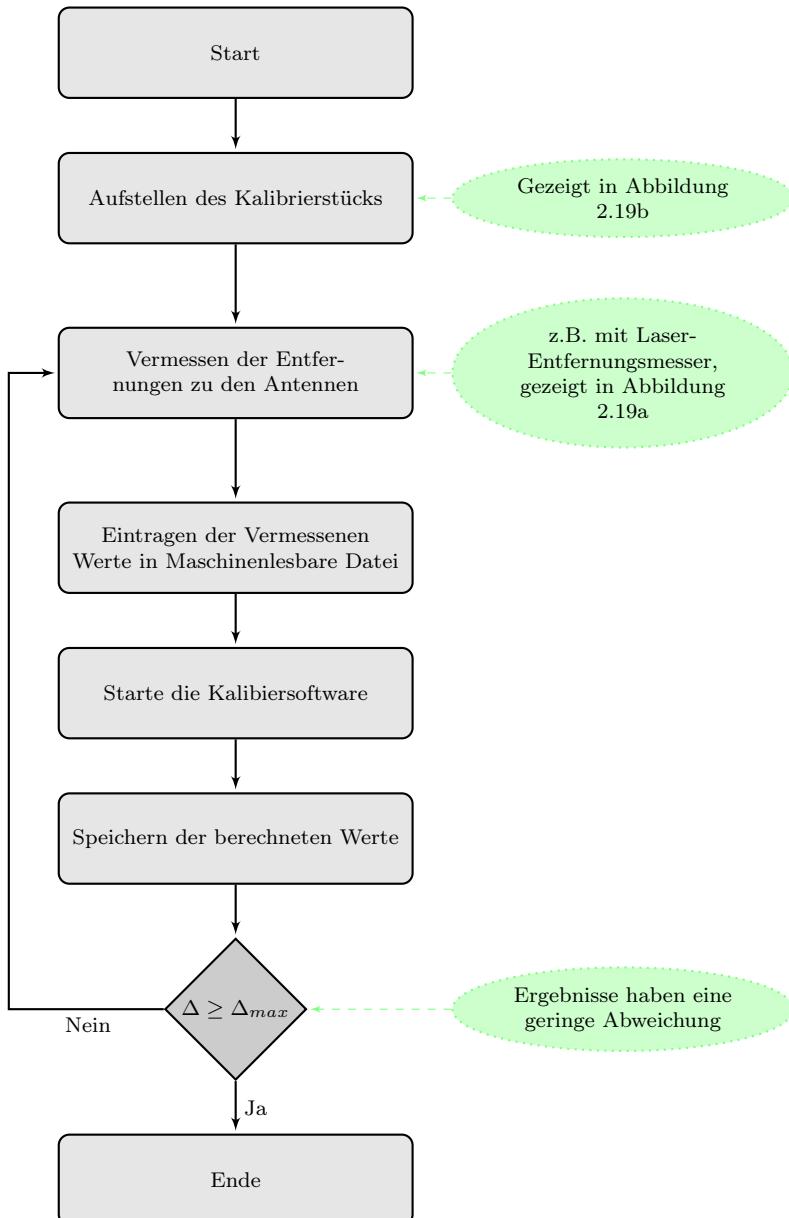
Dem ersten Punkt kommt im Rahmen dieser Arbeit eine besondere Bedeutung zu, es ist einfacher anhand dieses übersichtlichen Problems (mit nur drei Unbekannten) den Ablauf des Algorithmus sowie die Visualisierung der Ergebnisse zu erläutern. Die verwendete Darstellung gleicht der, die später bei der Präsentation und Beurteilung der komplexeren Modell verwendet wird.

2.7.2. Ergebnis

Es werden nun die Ergebnisse der Kalibrierung vorgestellt. Für eine der vermessenen Antennenkonfigurationen sind in der folgenden Tabelle die Koordinaten der Antennen gezeigt. Die Visualisierung der Konfiguration zeigt die Abbildung 2.17.

²d.h. weniger Rechenzeit ist erforderlich

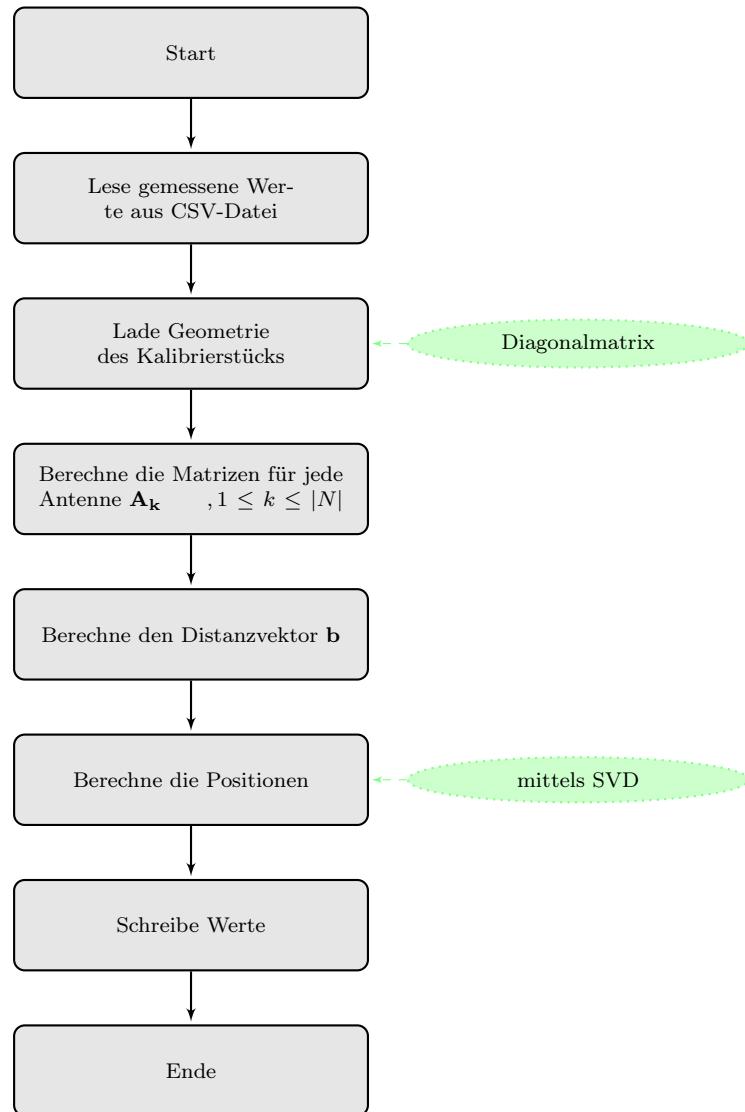
Abbildung 2.11.: Ablauf der Kalibrierung



Antenne	x	y	z	d_{meas}	d_{result}	ϵ_{abs}	ϵ_{rel}
1	0.479	-1.012	0.60	1,259	1,274	0,015	1,14%
2	-0.77	-1.04	1.34	1,894	1,872	-0,022	1,19%
3	1.52	-1.05	1.37	2,334	2,307	-0,027	1,15%
4	-0.92	-0.19	1.32	1,661	1,628	-0,033	2,01%
5	1.92	0.03	1.39	2,399	2,375	-0,024	1,01%
6	-0.55	1.09	1.43	1,851	1,887	0,036	1,93%
7	1.06	1.07	1.35	2,055	2,031	-0,024	1,19%
8	0.45	1.35	1,67	1,574	1,578	0,004	0,26%
							von 91

Tabelle 2.2.: Tabelle der finalen Antennenkoordinaten [m], berechnet mit dem in dieser Arbeit entwickelten Modell und dem SVD-Verfahren, die Ergebnisse wurden auf zwei Nachkommastellen gerundet und sind identisch für beide Methoden.

Abbildung 2.12.: Ablauf der libCalibration



Eine Berechnung mit dem evolutionären Verfahren dauerte ca. 170 ms mit dem SVD-verfahren wurde eine Lösung und ≤ 1 ms gefunden. Für die in der Praxis eingesetzte Software wird es eine Implementation der Kalibrierung mit dem SVD-Verfahren geben. Das Ergebnis der mit dieser Variante berechnete Verfahren wird bei Bedarf mit einer Lösung des evolutionären Verfahrens verglichen. Das ermöglicht eine Build-In Verifikation der Kalibrierung.

Für die in den folgenden Abbildungen präsentierten Ergebnisse wurden insge-

samt 100 Durchläufe des Algorithmus erstellt. Die Ergebnisse wurden mit einem vom Algorithmus selbst erstellten μ und λ gefunden. In Abbildung 2.13 wird eine statistische Auswertung der Ergebnisse gezeigt. In jedem Plot werden die Endwerte der Lösungen in einem sog. Boxplot gezeigt. Dabei wird die Verteilung mit Hilfe von Boxen dargestellt. Die Fähnchen der Boxen, stellen die maximal- bzw. minimal-Werte dar. Die Größe der Boxen enthält das obere und untere Quartil der Daten, der horizontale Strich in der Box zeigt den Mittelwert der Daten. Ausreißer in den Daten werden durch Punkte abseits der Box dargestellt.

Die Abbildung. 2.13 zeigt den Verlauf der drei Objektvariablen (x, y, z -Koordinaten) sowie die Entwicklung der Fitness und des mittleren Sigmas. Als Darstellungsart wird der Linienplot verwendet und die Verläufe einzelner Lösungen überlagern sich in diesem Plot. Das Abbruchkriterium war eine Fitness von $\leq 10^{-25}$. Für Darstellungszwecke wurde die x -Achse nach 500 Werten beschränkt, daher erreicht der Fitness-Plot diesen Wert in der Abbildung nicht. Der Verlauf ist typisch für den verwendeten Algorithmus. Deutlich zu erkennen ist eine Verbesserung des Ergebnisses mit steigender Zahl der Generationen. Der Verlauf der Variablen ist immer für den erfolgreichsten Nachkommen einer Generation dargestellt.

Abbildung 2.15 ist ein Scatter-Plot. Die Objektvariablen werden hier gegeneinander aufgetragen. Auf der Diagonalen befinden sich stets die Variable gegen sich selbst aufgetragen, daher zeigt sich dort immer eine Linie bzw. ein einzelner Punkt, sollten die Ergebnisse nicht streuen. Der Plot ist praktisch um die Implementations des Algorithmus zu verifizieren. Er lässt Rückschlüsse auf Abhängigkeiten und Einflüsse der Objektvariablen zu. So können die Ergebnisse mit den Erwartungen an die Verläufe verglichen werden.

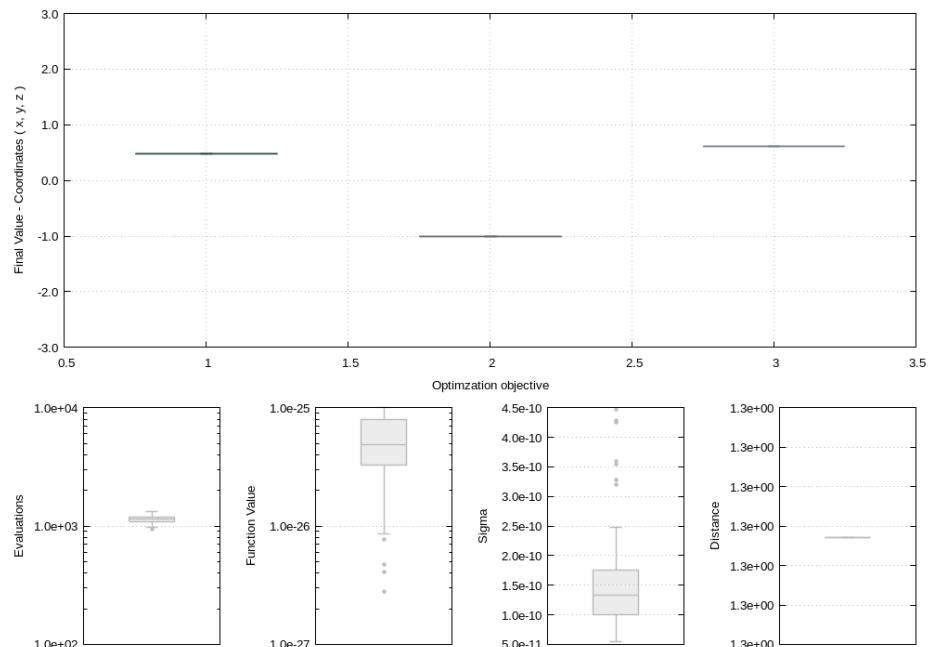


Abbildung 2.13.: Boxplot des Kalibierergebnis aus 100 Durchläufen. Im oberen Plot der sind die x,y,z-Koordinaten gezeigt, diese landen in allen Durchläufen auf dem selben Ergebnis. Das zeigt sich in der Breite der Linien. Die unteren vier Plots zeigen die Anzahl der Evaluationen der Fitness-Funktion, den finalen Funktionswert, das Sigma für die Variablen, die Entfernung zum Referenzpunkt (v.l.n.r.).

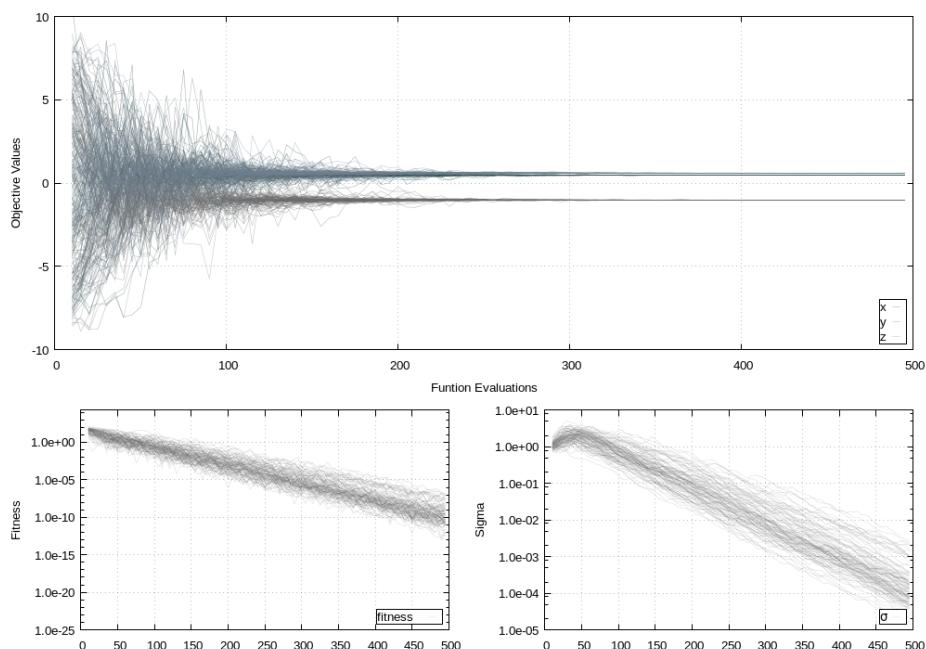


Abbildung 2.14.: Zu erkennen ist, das nach ca. 300 Evaluationen der Zielfunktion keine großen Änderungen der Variablen zu erkennen sind. Bis zum erreichen des Abbruchkriteriums (Function Value $\leq 10^{-25}$) werden noch ca 400 Evaluationen benötigt, vgl. korrespondierender Boxplot.

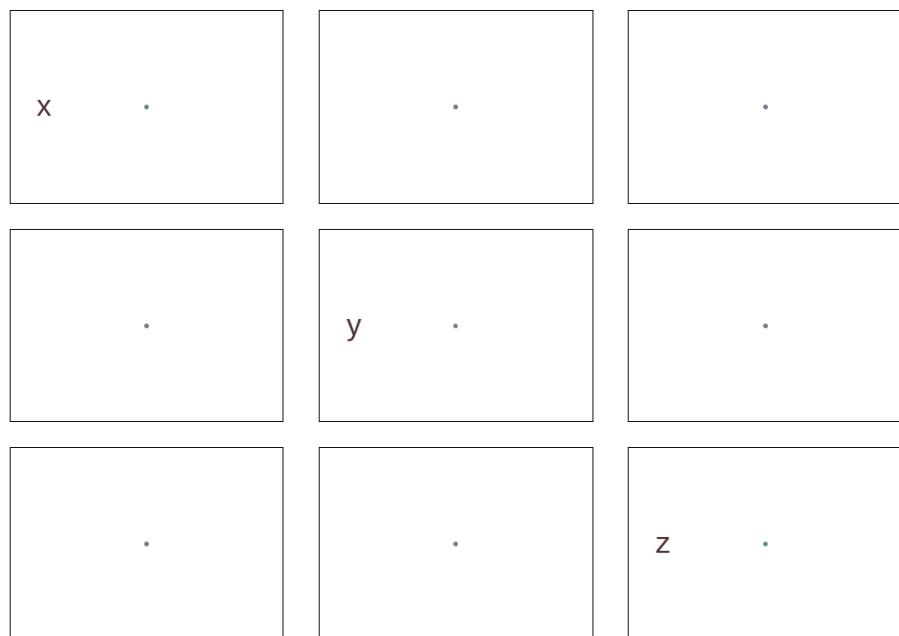


Abbildung 2.15.: Scatter-Plot der Ergebnisse der evolutionären Kalibrierung. Die Endergebnisse streuen in keiner Dimension, das wird aus dieser Darstellung deutlich.

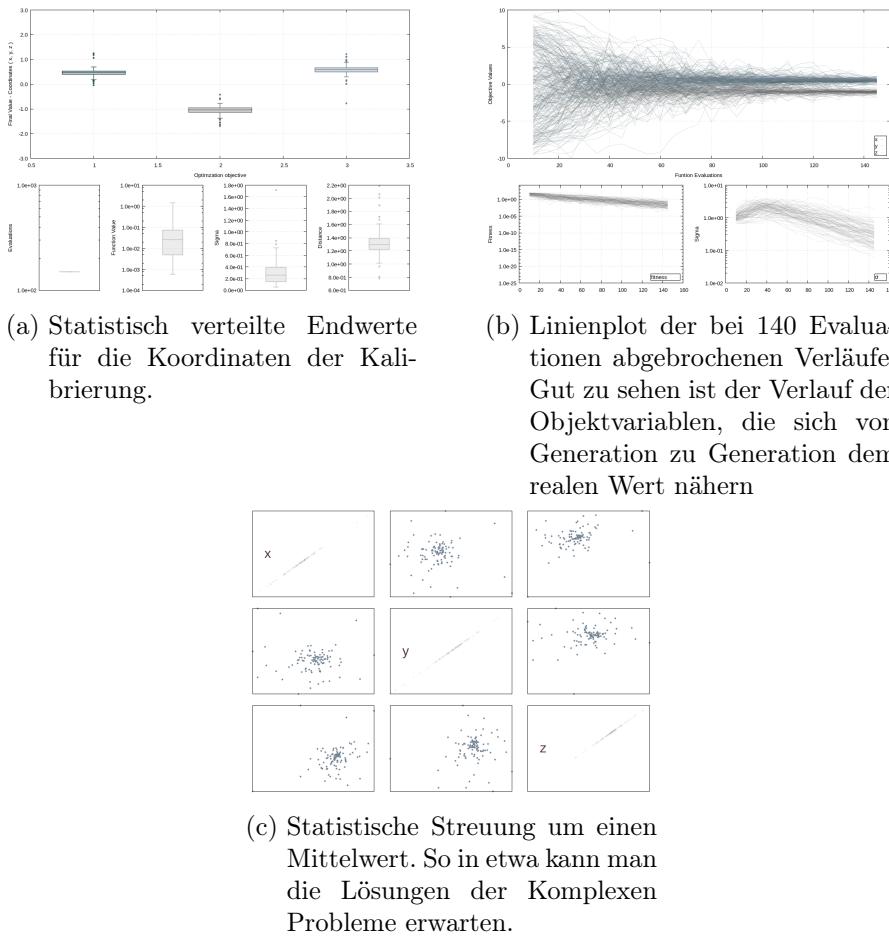


Abbildung 2.16.: Analog zu den Abbildungen 2.16b, 2.16a und 2.16c zeigen die Plots die gleichen Darstellungen. Hier gezeigt wird wie sich eine statistische Verteilung in den Plots manifestieren würde. Um das zu demonstrieren wurde das Abbruchkriterium auf lediglich 150 Evaluationen der Zielfunktion eingestellt. Zu diesem Zeitpunkt können die Objektvariablen bereits einen passablen Wert erreicht haben oder noch abweichende Werte aufweisen (vgl. 2.14).

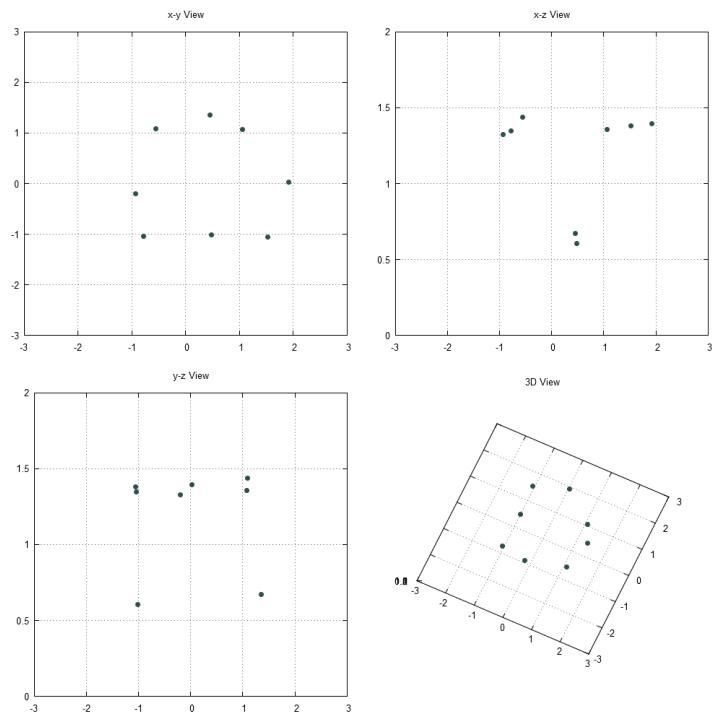
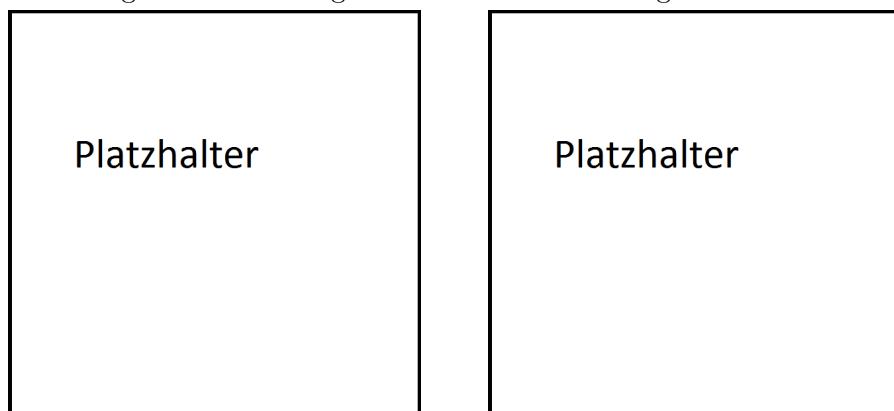


Abbildung 2.17.: Visualisierung des Kalibrierendergebnis. Abgebildet sind die gefundenen Antennenkoordinaten (Punkte) in drei Raumansichten. Die zusätzliche, dreidimensionale Ansicht dient der Überischt.

Abbildung 2.18.: Werkzeuge die bei der Kalibrierung verwendet werden.



2.8. Software

2.8.1. Shark

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

2.8.2. Implementation

In diesem Abschnitt wird auf interessante Details der Softwareimplementation eingegangen. Es ist nicht möglich im vollen Umfang die Implementation der Software aufgrund ihres Umfangs zu besprechen. Lediglich sollen hier die Implementationen verschiedener Evolutionsalgorithmen unter Verwendung von Shark gezeigt werden. Es wird auch beispielhaft eine Implementation einer Objektfunktion beschrieben, wie sie typischerweise in Shark implementiert wird.

2.8.3. Objektfunktion in Shark

Als Beispiel für die Implementation einer Objektfunktion wird im Folgenden das Modell der evolutionären Kalibrierung besprochen. Dieses Modell, bzw. Objektfunktion, hat eine überschaubare Komplexität und wurde bereits im Abschnitt 2.7 zur Veranschaulichung verwendet. Daher eignet es sich gut um die Implementation zu zeigen. Im Rahmen dieser Arbeit sind eine Vielzahl von Modellen entstanden, die nicht in aller Ausführlichkeit diskutiert werden können.

Das Listing 2.8.3 zeigt die Headerdatei für die Implementation einer Objektfunktion, sofort ist zu erkennen, dass sie von der abstrakten Klasse *SingleObjectiveFunction* abgeleitet ist. Diese ist einer von Shark bereitgestellte Klasse. Sie beschreibt die Funktionen die eine Objektfunktion implementieren muss damit sie von Optimizern verwendet werden kann. Ein von dieser Klasse abgeleitetes Modell erlaubt die Verwendung in verschiedenen Algorithmen. Die Funktion:

```
double eval(const SearchPointType &p) const;
```

wird von den Optimizern aufgerufen und implementiert die eigentliche Funktion des Modells.

```
void proposeStartingPoint(SearchPointType &x) const;
```

Diese Methode wird von einem Solver beim Start aufgerufen und liefert passende Startwerte für das Modell zurück. Der Rückgabewert der Funktion ist ein

normalverteilter Vektor der Dimension $m_numberOfVariables$ in einem Intervall von $[-10, 10]$ zurück. Der Wert für $m_numberOfVariables$ wird bei der Instanziierung des Modells, in dem Konstruktor, gesetzt. Es wird auch die Eigenschaft $CAN_PROPOSE_STARTING_POINT$ gesetzt, sie wird von den unterschiedlichen Optimizern verwendet um zu erkennen, welche Features vom Modell unterstützt werden.

```
EvolutionaryCalibration( ) {
    m_numberOfVariables = Solve::ProblemDimensions::Calibration;
    m_features |= CAN_PROPOSE_STARTING_POINT;
}
```

Listing 2.1: Quellcode Schnipsel für die Deklaration einer Objektfunktion

```
struct EvolutionaryCalibration : public SingleObjectiveFunction {

    typedef AbstractOptimizer<shark::VectorSpace<double>, double,
        SingleObjectiveResultSet<typename shark::VectorSpace<double> >::PointType> > base_type;

    typedef typename base_type::ObjectiveFunctionType
        ObjectiveFunctionType;

    EvolutionaryCalibration( ) {
        m_numberOfVariables = Solve::ProblemDimensions::Calibration;
        m_features |= CAN_PROPOSE_STARTING_POINT;
    }

    /// \brief From INameable: return the class name.
    std::string name() const
    { return "Evolutionary Calibration"; }

    std::size_t numberOfVariables() const{
        return m_numberOfVariables;
    }

    bool hasScalableDimensionality() const{
        return true;
    }

    void setNumberOfVariables( std::size_t numberOfVariables ){
        m_numberOfVariables = numberOfVariables;
    }

    void configure(const PropertyTree &node) {
        m_numberOfVariables = node.get("numberOfVariables", 51);
    }

    /**
     * Generate a starting value
     * @param[out] x The suggested search point
     */
    void proposeStartingPoint(SearchPointType &x) const {
        x.resize(numberOfVariables());
        for (unsigned int i = 0; i < 3; i++) {
            x(i) = Rng::uni(-10, 10);
        }
    }
}
```

```


    /**
     *
     */
double eval( const SearchPointType &p) const;

    /**
     *
     */
void setParams( const NRmatrix< Doub > &M,
                const NRvector< Doub > &v
               ) {
    setMat(M);
    setVec(v);
}

    /**
     *
     */
void setMat( const NRmatrix< Doub > &M ) {
    A = M;
    A_isSet = true;
}

    /**
     *
     */
void setVec( const NRvector< Doub > &v ) {
    b = v;
    b_isSet = true;
}

inline double mkII( const NRmatrix<Doub> &A, const double* x, const
NRvector<Doub> &b ) const;

private:
    std::size_t m_numberOfVariables;

    /** The Matrices we need to solve the Problem */
    NRmatrix< Doub > A;
    bool A_isSet = false;

    /** The b-vector needed to find a Solution */
    NRvector< Doub > b;
    bool b_isSet = false;
};


```

Das Listig 2.8.3 gezeigten cpp-Datei ist die Implementation der oben beschriebenen Modellfunktionen. Aus diesen Beiden Dateien ist ersichtlich, dass die Deklaration des Modells sehr überschaubar ist. Praktische jedes Modell hat diese übersichtliche Struktur.

```
inline double EvolutionaryCalibration::mkII( const NRmatrix<Doub> &A,
                                            const double* x, const NRvector<Doub> &b ) const
```

Diese Funktion ist die eigentliche Berechnung des Gleichungssystems der Form $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$. Die Lösung wird an die Aufrufende Funktion übergeben. Als Eingabe wird der Variablenvektor *const double*x* von Shark sowie die geom. Matrix und der Distanz Vektor erwartet. Der komplette Quellcode findet sich im Anhang B.1

und B.2 gelistet.

Listing 2.2: Quellcode Schnipsel für die Implementation einer Objektfunktion für verschiedene Optimzier im Shark

```

double EvolutionaryCalibration :: eval( const SearchPointType &p )
{
    const
    {
        m_evaluationCounter++;

        std :: vector<double> res;

        double x[ m_numberOfVariables ];

        x[ 0 ] = p[ 0 ];
        x[ 1 ] = p[ 1 ];
        x[ 2 ] = p[ 2 ];
        return mkII( A, x, b );
    }

    inline double EvolutionaryCalibration :: mkII( const NRmatrix<Doub>
        &A, const double* x, const NRvector<Doub> &b ) const
    {
        double res;
        double prod_Ax[3] = {0.,0.,0.};
        double x_[m_numberOfVariables];

        x_[0]=x[0];
        x_[1]=x[1];
        x_[2]=x[2];

        /* multiply the matrix with the vector */
        for( int i = 0; i < A.nrows(); i++ )
            for( int j = 0; j < A.ncols(); j++ )
                prod_Ax[i] += A[i][j]*x_[j];

        /* sum up */
        res = (prod_Ax[0] - b[0]) * (prod_Ax[0] - b[0]);
        res += (prod_Ax[1] - b[1]) * (prod_Ax[1] - b[1]);
        res += (prod_Ax[2] - b[2]) * (prod_Ax[2] - b[2]);

        return res;
    }
}

```

Schnittstelle für Dateneingabe

Im Folgenden wird die implementierte Schnittstelle besprochen mit der die Daten unter den Programmteilen ausgetauscht werden können. Die Schnittstelle umfasst im Wesentliche zwei Teile:

1. Eingabe für die gemessenen Phasenwerte
2. Ausgabe für die ermittelten Wellenzahlen

Hinzukommt eine pseudo-Schnittstelle über die die Systemparameter eingelesen werden können. Die aktuelle Implementation liest eine Eingabedatei, mit den Systemparametern in eine entsprechende Struktur ein. Die Kommunikation zwischen

dem PRPS-Dienst und dem PRPS-Evolution ist einfach. Der Dienst teilt die gemessenen Phasendaten mit, die vom PRPS-Evolution für die Berechnung der Wellenzahlen verwendet werden. Das bedeutet das der Ablauf des Auffindens der Wellenzahl vom PRPS-Dienst als 'Black-Box' angesehen wird.

2.8.4. Ablaufdiagramme

Vieles der Funktionalität der Software ist zu Umfangreich für dieses Dokument. Es kann keine vollständige Besprechung des Quellcodes durchgeführt werden. Im Folgenden werden daher diese Funktionalitäten und Abläufe in Ablaufplänen zusammenfassend dargestellt.

Abbildung 2.20.: Prozessschritte nach Start des Programms. Mit dem Punkt "Ende" ist nicht das Ende des Programms gemeint, sondern das Ende des Programmstarts. Nach diesen Schritten stehen alle statisch generierbaren verfügbaren Daten für das Programm zur Verfügung.

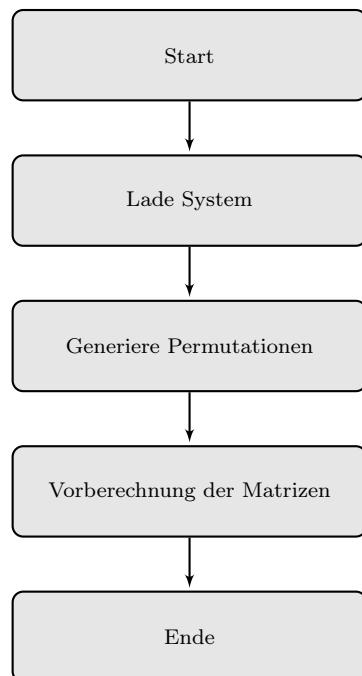


Abbildung 2.21.: Schritte die zur Lösungsfindung abgearbeitet werden. Dies ist ein Teil des Hauptprogramms, der die erstellten Informationen vom Programmstart in ein Modell zum Auffinden einer Lösung übergibt. Es werden eine beliebige Anzahl an Lösungen generiert.

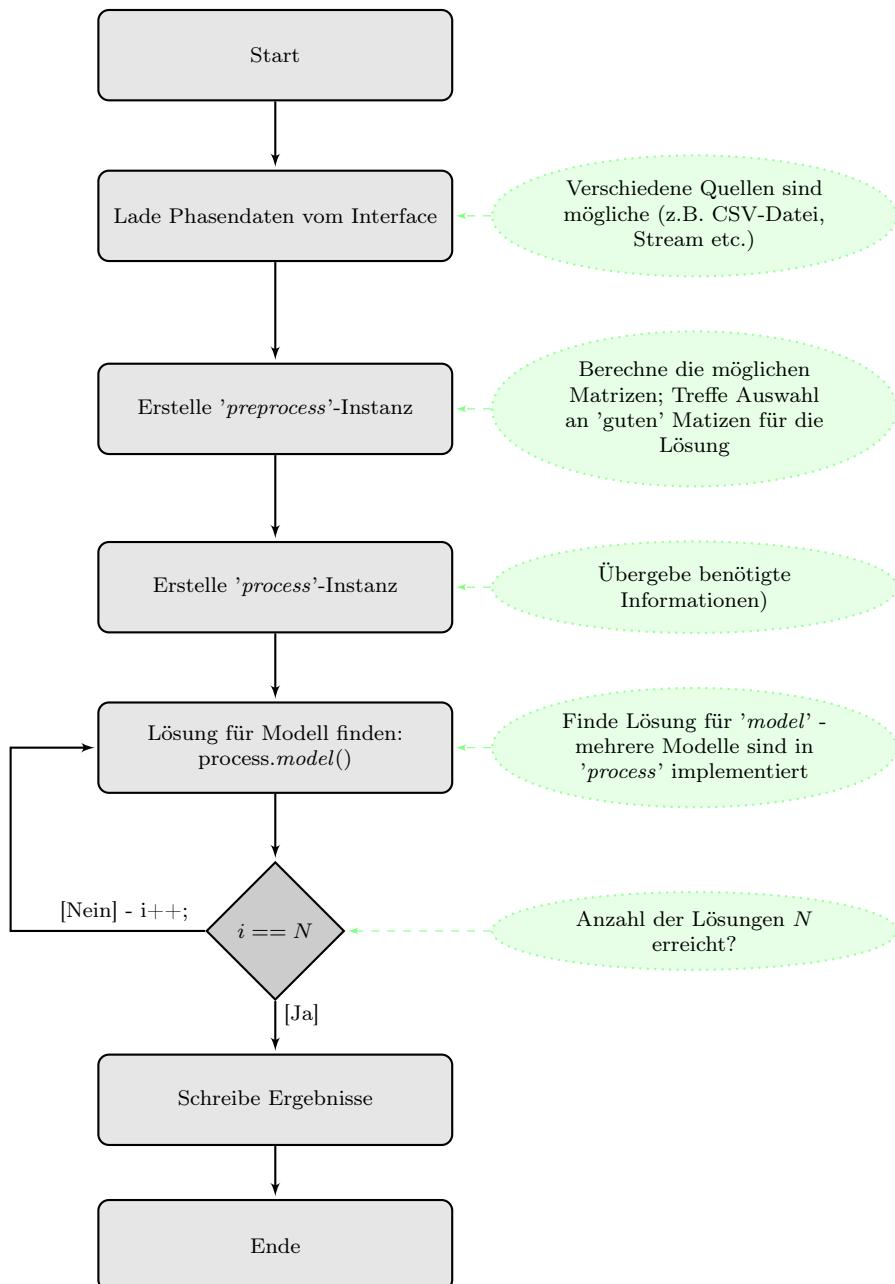
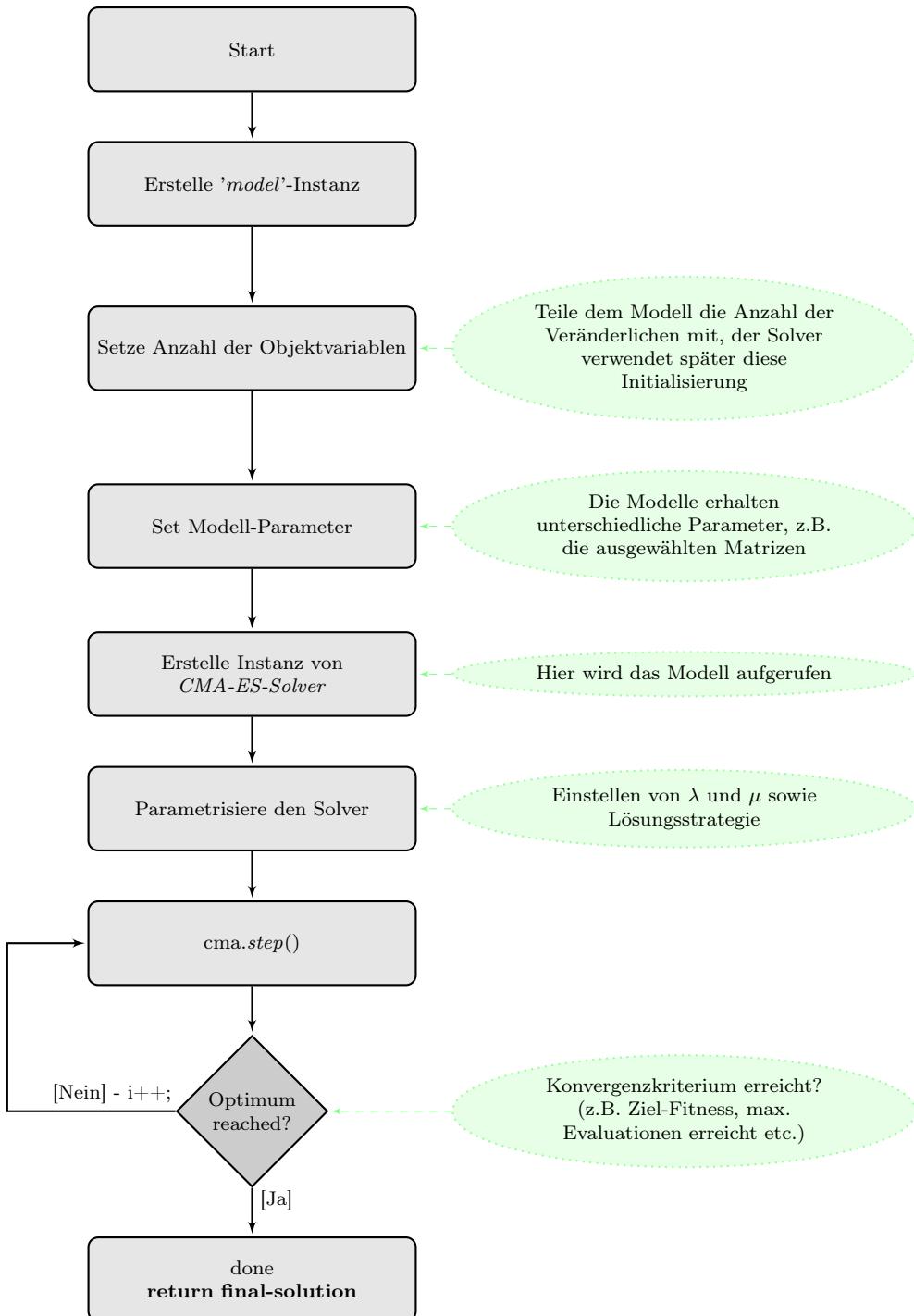


Abbildung 2.22.: Die Grafik zeigt den Ablauf im Modell um eine Lösung zu finden. Es werden so lange Evolutionsschritte durchgeführt bis das Konvergenzkriterium erreicht wird.



3. Ergebnisse und Erkenntnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit präsentiert. Zuerst werden künstliche Werte für die gemessene Phase als Eingabe für den Algorithmus verwendet. Darauf folgend werden Reale Messdaten als Input verwendet und die Resultate verglichen. Abschließend werden weitere Erkenntnisse präsentiert die während der Arbeit gewonnen werden konnten.

3.1. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Arbeit werden hier vorgestellt. Die Modelle die in 2.2 entwickelt wurde, wurden in verschiedenen Experimenten untersucht.

Zunächst werden die Ergebnisse der idealen Messwerte vorgestellt. Dazu wurden eine Reihe von Punkten definiert, von denen die Idealen Phasenwerte ermittelt wurden.

3.2. Erkenntnisse

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellen-tesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam.

Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetur at, consectetur sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

Morbi luctus, wisi viverra faucibus pretium, nibh est placerat odio, nec commodo wisi enim eget quam. Quisque libero justo, consectetur a, feugiat vitae, porttitor eu, libero. Suspendisse sed mauris vitae elit sollicitudin malesuada. Maecenas ultricies eros sit amet ante. Ut venenatis velit. Maecenas sed mi eget dui varius euismod. Phasellus aliquet volutpat odio. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Pellentesque sit amet pede ac sem eleifend consectetur. Nullam elementum, urna vel imperdiet sodales, elit ipsum pharetra ligula, ac pretium ante justo a nulla. Curabitur tristique arcu eu metus. Vestibulum lectus. Proin mauris. Proin eu nunc eu urna hendrerit faucibus. Aliquam auctor, pede consequat laoreet varius, eros tellus scelerisque quam, pellentesque hendrerit ipsum dolor sed augue. Nulla nec lacus.

Suspendisse vitae elit. Aliquam arcu neque, ornare in, ullamcorper quis, commodo eu, libero. Fusce sagittis erat at erat tristique mollis. Maecenas sapien libero, molestie et, lobortis in, sodales eget, dui. Morbi ultrices rutrum lorem. Nam elementum ullamcorper leo. Morbi dui. Aliquam sagittis. Nunc placerat. Pellentesque tristique sodales est. Maecenas imperdiet lacinia velit. Cras non urna. Morbi eros pede, suscipit ac, varius vel, egestas non, eros. Praesent malesuada, diam id pretium elementum, eros sem dictum tortor, vel consectetur odio sem sed wisi.

4. Diskussion

Vergleich der Ergebnisse mit den Zielen der Arbeit.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellen-tesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in

henderit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

4.1. Verbesserungen

Wie in den Ergebnissen gezeigt, können unter gewissen Umständen (schlechte Konditionierung, geringe Anzahl an Antennen) unzureichende Ergebnisse erzielt werden. Zur Zeit wird in einem solchen Fall ein statistischer Ansatz versucht. Dazu werden eine häufigere Anzahl an Lösungsversuchen durchgeführt und der Median-Wert genommen. Die Auswahl verschiedener Antennenkombinationen ermöglicht dabei eine weitere Verbesserung der Werte. Dadurch erhöht sich jedoch die Ausführungszeit, bzw. die Zeit bis ein Ergebnis vorliegt auf zum Teil mehrere Sekunden. Das liegt außerhalb der Anforderungen.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte eine automatische Kalibrierung nicht mehr entwickelt und erprobt werden. Die vorgestellten Ergebnisse sind prinzipiell dazu geeignet auf dieser Basis ein solches System zu entwickeln.

Die Ergebnisse dieser Arbeit weisen noch relativ große Abweichungen in der berechneten z-Koordinate auf. Warum diese auftreten konnte nicht mehr abschließend geklärt werden.

4.2. Ausblick

Das Modell, das in dieser Arbeit entwickelt wurde, ermöglicht eine Anwendung Abseits der Positions berechnung. Es erlaubt ein anderes Problem zu Lösung, dass durch die Freie Anordnung der Antennen entsteht. Wenn mehrere Tags im Raum identifiziert werden, muss die Steuerung der Antennen umschaltung (diese bestimmt von welcher Antenne gerade gelesen wird - es können nicht gleichzeitig alle Antennen gelesen werden) zur Zeit alle Antennen in einem Round-Robin-Verfahren nach einer gewissen Zeit umschalten. Nach einer Umschaltung kann es dazu kommen, dass keine der Antennen einen der zuvor identifizierten Tags "sieht". Da die Umschaltung zur Zeit zufällig zur nächsten Antenne springt, werden auch Antennen genommen, die keine günstige Positions berechnung erlauben.

Die Bestimmung der Kondition für jede Konfiguration aus vier Antennen kann dazu verwendet werden eine gewisse Intelligenz beizutragen. Dazu würden aus dem gewählten Antennenaufbau die Antennenkombinationen ihrer Konditionszahl nach Aufsteigend^{1]} sortiert und diese Antennenkombinationen von der Antennenumschaltung bevorzugt. Dadurch werden stets gut konditionierte Kombinationen gewählt.

¹zur Erinnerung, gute Kondition = kleine Konditionszahl

5. Schluss

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

5.1. Verbesserungen

Wie in den Ergebnissen gezeigt, können unter gewissen Umständen (schlechte Konditionierung, geringe Anzahl an Antennen) unzureichende Ergebnisse erzielt werden. Zur Zeit wird dieser Umstand durch eine häufigere Anzahl an Lösungsversuchen, sowie Verwendung verschiedener Antennenkombinationen kompensiert. Dadurch erhöht sich jedoch die Ausführungszeit, bzw. die Zeit bis ein Ergebnis vorliegt auf zum Teil mehrere Sekunden. Das liegt außerhalb der Anforderungen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte eine automatische Kalibrierung nicht mehr entwickelt und erprobt werden. Die vorgestellten Ergebnisse sind prinzipiell dazu geeignet auf dieser Basis ein solches System zu entwickeln.

Die Ergebnisse dieser Arbeit weisen noch relativ große Abweichungen in der berechneten z-Koordinate auf. Warum diese auftreten konnte nicht mehr abschließend geklärt werden.

5.2. Ausblick

Das Modell, das in dieser Arbeit entwickelt wurde, ermöglicht eine Anwendung Abseits der Positions berechnung. Es erlaubt ein anderes Problem zu Lösung, dass durch die Freie Anordnung der Antennen entsteht. Wenn mehrere Tags im Raum identifiziert werden, muss die Steuerung der Antennen umschaltung (diese bestimmt von welcher Antenne gerade gelesen wird - es können nicht gleichzeitig alle Antennen gelesen werden) zur Zeit alle Antennen in einem Round-Robin-Verfahren nach einer gewissen Zeit umschalten. Nach einer Umschaltung kann es dazu kommen, dass keine der Antennen einen der zuvor identifizierten Tags "sieht". Da die Umschaltung zur Zeit zufällig zur nächsten Antenne springt, werden auch Antennen genommen, die keine günstige Positions berechnung erlauben.

Die Bestimmung der Kondition für jede Konfiguration aus vier Antennen kann dazu verwendet werden eine gewisse Intelligenz beizutragen. Dazu würden aus dem gewählten Antennenaufbau die Antennen kombinationen ihrer Konditionszahl nach Aufsteigend^{1]} sortiert und diese Antennen kombinationen von der Antennen umschaltung bevorzugt. Dadurch werden stets gut konditionierte Kombinationen gewählt.

¹zur Erinnerung, gute Kondition = kleine Konditionszahl

A. Abbildungen

A.1. Messaufbauten

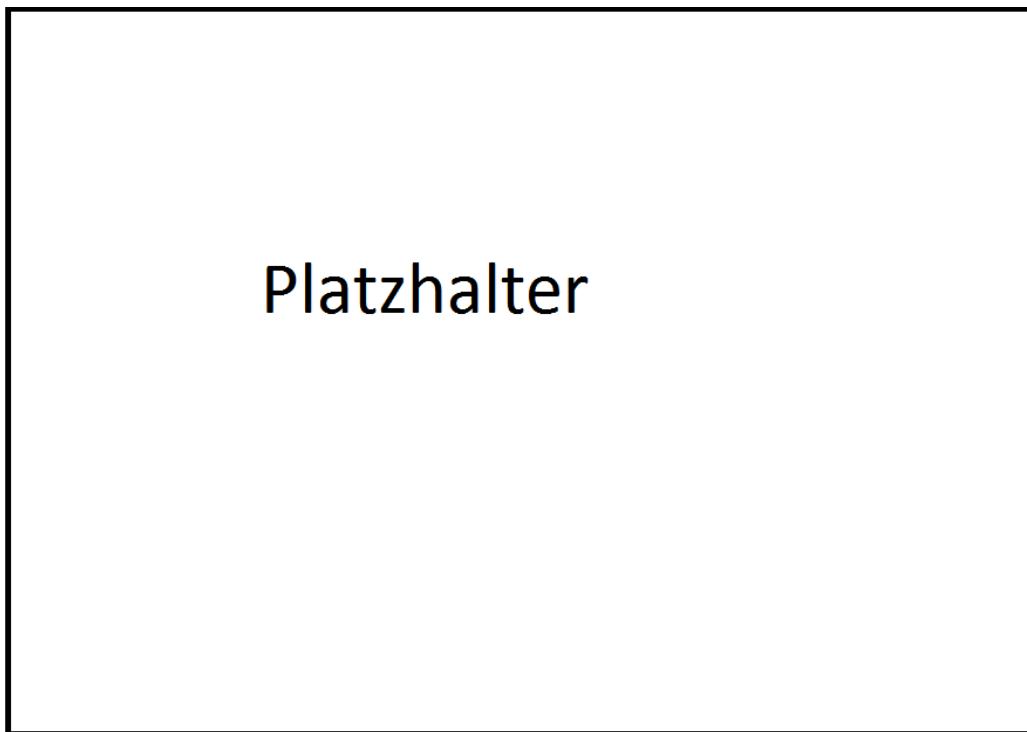


Abbildung A.1.: PRPS-Messsystem in der "Spinnen"-Konfiguration. Es umfasst vier Messwertgeber und eine Recheneinheit.

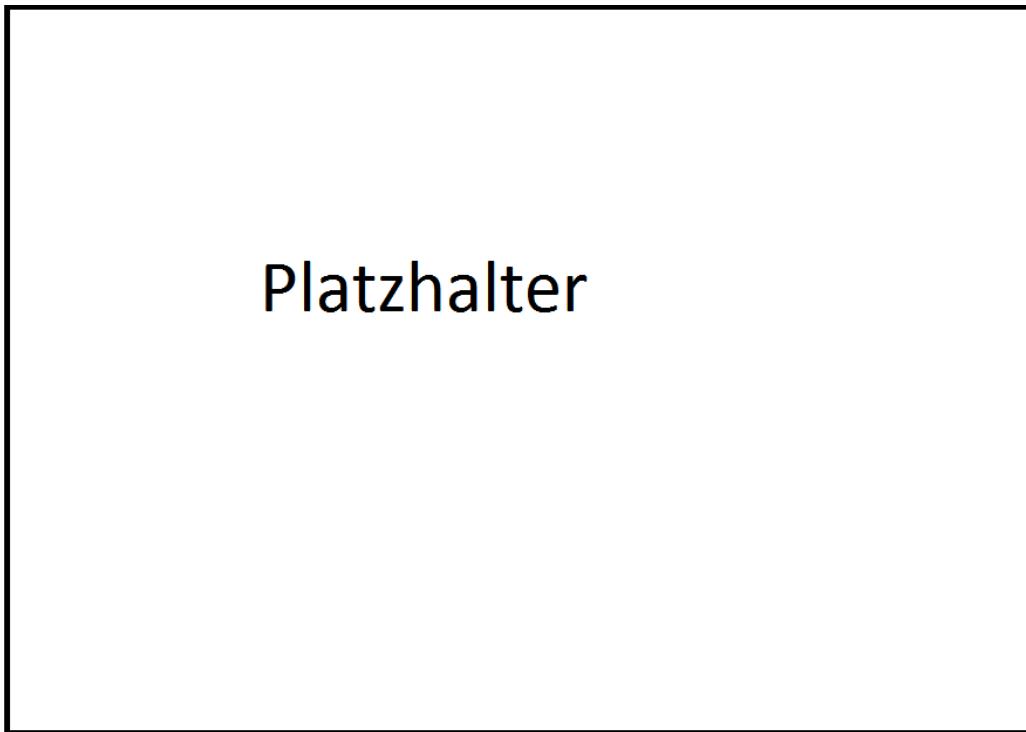


Abbildung A.2.: Aufbau des für die Kalibrierung verwendeten Messaufbaus.

B. Quellcode Auzüge

B.1. ObjectiveFunktion - Evolutionary Calibration Header

Vollständiger Quellcode der EvolutionaryCalibration.h

```
1 #ifndef _EVOLUTIONARY_CALIBRATION_H_
2 #define _EVOLUTIONARY_CALIBRATION_H_
3
4 #include <shark/ObjectiveFunctions/AbstractObjectiveFunction.h>
5 #include <shark/Algorithms/DirectSearch/CMA.h>
6 #include <shark/Algorithms/AbstractOptimizer.h>
7 #include <shark/Rng/GlobalRng.h>
8 #include <nr3/nr3.h>
9 #include "../solve.h"
10
11 namespace PRPSEvolution {
12     namespace Models {
13         using namespace shark;
14
15         /**
16         *
17         */
18     struct EvolutionaryCalibration : public SingleObjectiveFunction {
19
20         typedef AbstractOptimizer<shark::VectorSpace<double>, double,
21             SingleObjectiveResultSet<typename shark::VectorSpace<double>::PointType>> base_type;
22
23         typedef typename base_type::ObjectiveFunctionType
24             ObjectiveFunctionType;
25
26         EvolutionaryCalibration() {
27             m_numberOfVariables = Solve::ProblemDimensions::Calibration;
28             m_features |= CAN_PROPOSE_STARTING_POINT;
29         }
30
31         /// \brief From INameable: return the class name.
32         std::string name() const
33         { return "Evolutionary Calibration"; }
34
35         std::size_t numberOfVariables() const{
36             return m_numberOfVariables;
37         }
38
39         bool hasScalableDimensionality() const{
40             return true;
41         }
42
43         void setNumberOfVariables( std::size_t numberOfVariables ){
44             m_numberOfVariables = numberOfVariables;
45         }
46     }
```

```

45     void configure(const PropertyTree &node) {
46         m_numberOfVariables = node.get("numberOfVariables", 51);
47     }
48
49     /**
50      * Generate a starting value
51      * @param[out] x The suggested search point
52      *
53     */
54     void proposeStartingPoint(SearchPointType &x) const {
55         x.resize(numberOfVariables());
56
57         for (unsigned int i = 0; i < 3; i++) {
58             x(i) = Rng::uni(-10, 10);
59         }
60     }
61
62     /**
63      *
64     */
65     double eval(const SearchPointType &p) const;
66
67     /**
68      *
69     */
70     void setParams( const NRmatrix< Doub > &M,
71                     const NRvector< Doub > &v
72                     ) {
73         setMat(M);
74         setVec(v);
75     }
76
77
78     /**
79      *
80     */
81     void setMat( const NRmatrix< Doub > &M ) {
82         A = M;
83         A._isSet = true;
84     }
85
86
87     /**
88      *
89     */
90     void setVec( const NRvector< Doub > &v ) {
91         b = v;
92         b._isSet = true;
93     }
94
95     inline double mkII( const NRmatrix<Doub> &A, const double* x, const
96                         NRvector<Doub> &b ) const;
97
98 private:
99     std::size_t m_numberOfVariables;
100
101    /**
102     * The Matrices we need to solve the Problem */
103    NRmatrix< Doub > A;
104    bool A._isSet = false;
105
106    /**
107     * The b-vector needed to find a Solution */
108    NRvector< Doub > b;
109    bool b._isSet = false;

```

```
108 | };  
109 |  
110 |     ANNOUNCE_SINGLE_OBJECTIVE_FUNCTION( EvolutionaryCalibration ,  soos::  
|         RealValuedObjectiveFunctionFactory );  
111 |     }  
112 | } /* end namespace */  
113 #endif /* _EVOLUTIONARY_CALIBRATION_H_ */
```

B.2. ObjectiveFunktion - Evolutionary Calibration Source

Vollständiger Quellcode der EvolutionaryCalibration.cpp

```

1 #include "EvolutionaryCalibration.h"
2
3 namespace PRPSEvolution {
4     namespace Models {
5         using namespace shark;
6
7         double EvolutionaryCalibration::eval( const SearchPointType &p )
8             const
9         {
10             m_evaluationCounter++;
11             std::vector<double> res;
12
13             double x[ m_numberOfVariables ];
14
15             x[ 0 ] = p[ 0 ];
16             x[ 1 ] = p[ 1 ];
17             x[ 2 ] = p[ 2 ];
18             return mkII( A, x, b );
19
20         }
21
22         inline double EvolutionaryCalibration::mkII( const NRmatrix<Double>
23             &A, const double* x, const NRvector<Double> &b ) const
24         {
25             double res;
26             double prod_Ax[3] = { 0., 0., 0. };
27             double x_[m_numberOfVariables];
28
29             x_[0]=x[0];
30             x_[1]=x[1];
31             x_[2]=x[2];
32
33             /* multiply the matrix with the vector */
34             for( int i = 0; i < A.nrows(); i++ )
35                 for( int j = 0; j < A.ncols(); j++ )
36                     prod_Ax[i] += A[i][j]*x_[j];
37
38             /* sum up */
39             res = (prod_Ax[0] - b[0]) * (prod_Ax[0] - b[0]);
40             res += (prod_Ax[1] - b[1]) * (prod_Ax[1] - b[1]);
41             res += (prod_Ax[2] - b[2]) * (prod_Ax[2] - b[2]);
42
43             return res;
44         }
45
46     } /* !namespace */
47 } /* !namespace */

```

C. Gnuplot Skripte

C.1. Boxplot

Listing C.1: Gnuplot Boxplot-Skript

```
1 set style line 1 linetype 1 linecolor rgbcolor "#2f4f4f" linewidth  
2     1.5 pointtype 7 pointsize .5 pointinterval 1  
3 set style line 2 linetype 1 linecolor rgbcolor "#696969" linewidth  
4     1.5 pointtype 7 pointsize .5 pointinterval 1  
5 set style line 3 linetype 1 linecolor rgbcolor "#708090" linewidth  
6     1.5 pointtype 7 pointsize .5 pointinterval 1  
7 set style line 4 linetype 1 linecolor rgbcolor "#bebebe" linewidth  
8     1.5 pointtype 7 pointsize .5 pointinterval 1  
9  
10 if( i == 0 ) set terminal pngcairo truecolor transparent background "#  
11     ffffff" enhanced font "arial,10" size w, h  
12  
13 set style fill transparent solid 0.3 noborder  
14 #set style boxplot outliers pointtype 19  
15 #set style data boxplot  
16 #set key right bottom vertical Left noreverse enhanced box samplen .2  
17 #set key opaque  
18 set grid  
19  
20 #in this column we find the Data for sigma  
21 lastDataCol = 3+a+2  
22 #int this column we expect the vector  
23 vectorCol = 3+a+3  
24 inputfile = "data/single_.i_.dat"  
25 outMultiplot = "img/boxen/kondensiert/.i_.png"  
26  
27 set output outMultiplot  
28 set multiplot layout 1,3  
29 unset logscale  
30 set autoscale  
31 unset label  
32  
33 #  
34  
35 #setup the 1. plot  
36 set style data boxplot  
37 set xlabel "Optimization objective"  
38 set ylabel "Final Value - Coordinates ( x, y, z )"  
39  
40 set size 1, .6  
41 set origin .0,.4  
42 set autoscale  
43 set xrange [.5:a+.5]  
44 set xtics  
45  
46 set ytics format "%1.1f"  
47 set yrange [-3:3]  
48 if(a>3) set y2tics format "%1.1f"
```

```

43 if(a>3) set y2label "Final Value - Wavenumbers ( n )"
44
45 print "a=",a
46 if(a==7) set xtics ("x" 1, "y" 2, "z" 3 ) scale 0.0
47 if(a==3) plot inputfile u (1):5 ls 1 axes x1y1 notitle , \
48     '' u (2):6 ls 2 axes x1y1 notitle , \
49     '' u (3):7 ls 3 axes x1y1 notitle
50 if(a==3) unset y2tics
51 if(a==3) unset y2label
52
53 if(a==6) plot inputfile u (1):5 ls 1 notitle , \
54     '' u (2):6 ls 2 notitle , \
55     '' u (3):7 ls 3 notitle , \
56     '' u (4):8 ls 4 notitle , \
57     '' u (5):9 ls 4 notitle , \
58     '' u (6):10 ls 4 notitle
59
60 if(a==7) set xtics ("x" 1, "y" 2, "z" 3, "n0" 4,"n1" 5,"n2" 6,"n3" 7)
61     scale 0.0
62
63 if(a==7) plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):5 ls 1 axes x1y1
64     notitle , \
65     '' u ($2 < limit ? (2): 1/0):6 ls 2 axes x1y1 notitle , \
66     '' u ($2 < limit ? (3): 1/0):7 ls 3 axes x1y1 notitle , \
67     '' u ($2 < limit ? (4): 1/0):8 ls 4 axes x1y2 notitle , \
68     '' u ($2 < limit ? (5): 1/0):9 ls 4 axes x1y2 notitle , \
69     '' u ($2 < limit ? (6): 1/0):10 ls 4 axes x1y2 notitle , \
70     '' u ($2 < limit ? (7): 1/0):11 ls 4 axes x1y2 notitle
71
72 if(a==8) set xtics ("x" 1, "y" 2, "z" 3, "n0" 4,"n1" 5,"n2" 6,"n3" 7,
73     "n4" 8) scale 0.0
74
75 if(a==8) plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):5 ls 1 axes x1y1
76     notitle , \
77     '' u ($2 < limit ? (2): 1/0):6 ls 2 axes x1y1 notitle , \
78     '' u ($2 < limit ? (3): 1/0):7 ls 3 axes x1y1 notitle , \
79     '' u ($2 < limit ? (4): 1/0):8 ls 4 axes x1y2 notitle , \
80     '' u ($2 < limit ? (5): 1/0):9 ls 4 axes x1y2 notitle , \
81     '' u ($2 < limit ? (6): 1/0):10 ls 4 axes x1y2 notitle , \
82     '' u ($2 < limit ? (7): 1/0):11 ls 4 axes x1y2 notitle , \
83     '' u ($2 < limit ? (8): 1/0):12 ls 4 axes x1y2 notitle
84
85 if(a==9) set xtics ("x" 1, "y" 2, "z" 3, "n0" 4,"n1" 5,"n2" 6,"n3" 7,
86     "n4" 8, "N5" 9) scale 0.0
87
88 if(a==9) plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):5 ls 1 axes x1y1
89     notitle , \
90     '' u ($2 < limit ? (2): 1/0):6 ls 2 axes x1y1 notitle , \
91     '' u ($2 < limit ? (3): 1/0):7 ls 3 axes x1y1 notitle , \
92     '' u ($2 < limit ? (4): 1/0):8 ls 4 axes x1y2 notitle , \
93     '' u ($2 < limit ? (5): 1/0):9 ls 4 axes x1y2 notitle , \
94     '' u ($2 < limit ? (6): 1/0):10 ls 4 axes x1y2 notitle , \
95     '' u ($2 < limit ? (7): 1/0):11 ls 4 axes x1y2 notitle , \
96     '' u ($2 < limit ? (8): 1/0):12 ls 4 axes x1y2 notitle , \
97     '' u ($2 < limit ? (9): 1/0):12 ls 4 axes x1y2 notitle
98

```

```

99      '' u ($2 < limit ? (4): 1/0):8 ls 4 axes x1y2 notitle , \
100     '' u ($2 < limit ? (5): 1/0):9 ls 4 axes x1y2 notitle , \
101     '' u ($2 < limit ? (6): 1/0):10 ls 4 axes x1y2 notitle , \
102     '' u ($2 < limit ? (7): 1/0):11 ls 4 axes x1y2 notitle , \
103     '' u ($2 < limit ? (8): 1/0):12 ls 4 axes x1y2 notitle , \
104     '' u ($2 < limit ? (9): 1/0):12 ls 4 axes x1y2 notitle , \
105     '' u ($2 < limit ? (10): 1/0):12 ls 4 axes x1y2 notitle
106
107 if(a==11) set xtics ("x" 1, "y" 2, "z" 3, "n0" 4,"n1" 5,"n2" 6,"n3" 7,
108           "n4" 8, "N5" 9, "N6" 10, "N7" 11) scale 0.0
109
110 if(a==11) plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):5 ls 1 axes x1y1
111   notitle , \
112   '' u ($2 < limit ? (2): 1/0):6 ls 2 axes x1y1 notitle , \
113   '' u ($2 < limit ? (3): 1/0):7 ls 3 axes x1y1 notitle , \
114   '' u ($2 < limit ? (4): 1/0):8 ls 4 axes x1y2 notitle , \
115   '' u ($2 < limit ? (5): 1/0):9 ls 4 axes x1y2 notitle , \
116   '' u ($2 < limit ? (6): 1/0):10 ls 4 axes x1y2 notitle , \
117   '' u ($2 < limit ? (7): 1/0):11 ls 4 axes x1y2 notitle , \
118   '' u ($2 < limit ? (8): 1/0):12 ls 4 axes x1y2 notitle , \
119   '' u ($2 < limit ? (9): 1/0):12 ls 4 axes x1y2 notitle , \
120   '' u ($2 < limit ? (10): 1/0):12 ls 4 axes x1y2 notitle
121 unset label
122 unset y2label
123 unset y2range
124 unset y2tics
125 #
126
127 #setup the 2. plot
128 set boxwidth 0.05 relative
129
130 set autoscale
131 set xlabel ""
132 set logscale y
133 set ylabel "Evaluations"
134 set size .25, .4
135 set origin .0,.0
136 unset xtics
137 #set xrange [-.2:.4]
138 set ytics format "%.1e"
139
140 plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):2 ls 4 notitle
141
142 #
143
144 #setup the 3. plot
145 set logscale y
146 set ytics
147 set xlabel ""
148 set ylabel "Function Value"
149 set size .25, .4
150 set origin .25,.0
151 unset xtics
152 set ytics format "%.1e"
153
154 plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):3 ls 4 notitle
155

```

```
156 #

---

  
157 #setup the 4. plot  
158 set xlabel ""  
159 set ylabel "Sigma"  
160 set ytics format "%.1e"  
161  
162 set size .25, .4  
163 set origin .50,.0  
164  
165 unset logscale  
166 set autoscale  
167 unset xtics  
168 set ytics  
169  
170 plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):lastDataCol ls 4 notitle  
171  
172 #

---

  
173 #setup the 5. plot  
174 set xlabel ""  
175 set ylabel "Distance"  
176 set ytics format "%.1e"  
177  
178 set size .25, .4  
179 set origin .75,.0  
180  
181 set autoscale  
182 unset xtics  
183 set ytics  
184  
185 plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):vectorCol ls 4 notitle  
186  
187 #

---

  
188 i=i+1  
189  
190 unset multiplot  
191 unset xtics  
192  
193 if ( i < m) reread  
194 i=0
```

C.2. Lineplot

Listing C.2: Gnuplot Lineplot-Skript

```

1  #prerequisites set i, n and the number of antennas to proper values
2  at(file , row, col) = system( sprintf("awk -v row=%d -v col=%d 'NR ==
   row {print $col}' %s", row, col, file) )
3
4  set style line 1 linetype 1 linecolor rgbcolor "#882f4f4f" linewidth
   .5
5  set style line 2 linetype 1 linecolor rgbcolor "#88696969" linewidth
   .5
6  set style line 3 linetype 1 linecolor rgbcolor "#88708090" linewidth
   .5
7  set style line 4 linetype 1 linecolor rgbcolor "#ccbebebe" linewidth
   .5
8
9  set style line 5 linetype 1 linecolor rgbcolor "#99696969" linewidth
   .3
10
11 if( i == 0 ) set terminal pngcairo truecolor transparent background "#ffff
   ffffff" enhanced font "arial,10" size w, h
12
13 set key right bottom vertical Left noreverse enhanced box samplen .2
14 set key opaque
15 set grid
16
17 lastDataCol = 3+a+2
18 inputfile = "data/.i.".dat"
19 outMultiplot = "img/linien/kondensiert/.i.".png"
20
21 file=inputfile ; row=2 ; col=2
22
23 set output outMultiplot
24 set multiplot layout 1,3
25 unset logscale
26 set autoscale
27
28 #
_____
29 stats inputfile u 1 name "Stat" nooutput
30
31 #print "test ".at(file , Stat_records , 1)
32
33 locallimit=0.001*limit
34 if(a<=3)print "local limit is: ",locallimit
35
36 #setup the first plot
37 set xrange [0:locallimit]
38
39 set ytics format "%0.0f"
40 set yrange [-10:10]
41
42 if(a>3) set autoscale
43
44 set clip one
45 set xlabel "Funtion Evaluations"
46 set ylabel "Objective Values"
47 set xtics
48 set ytics
49 set size 1., .6
50 set origin .0 ,.4
51

```

```

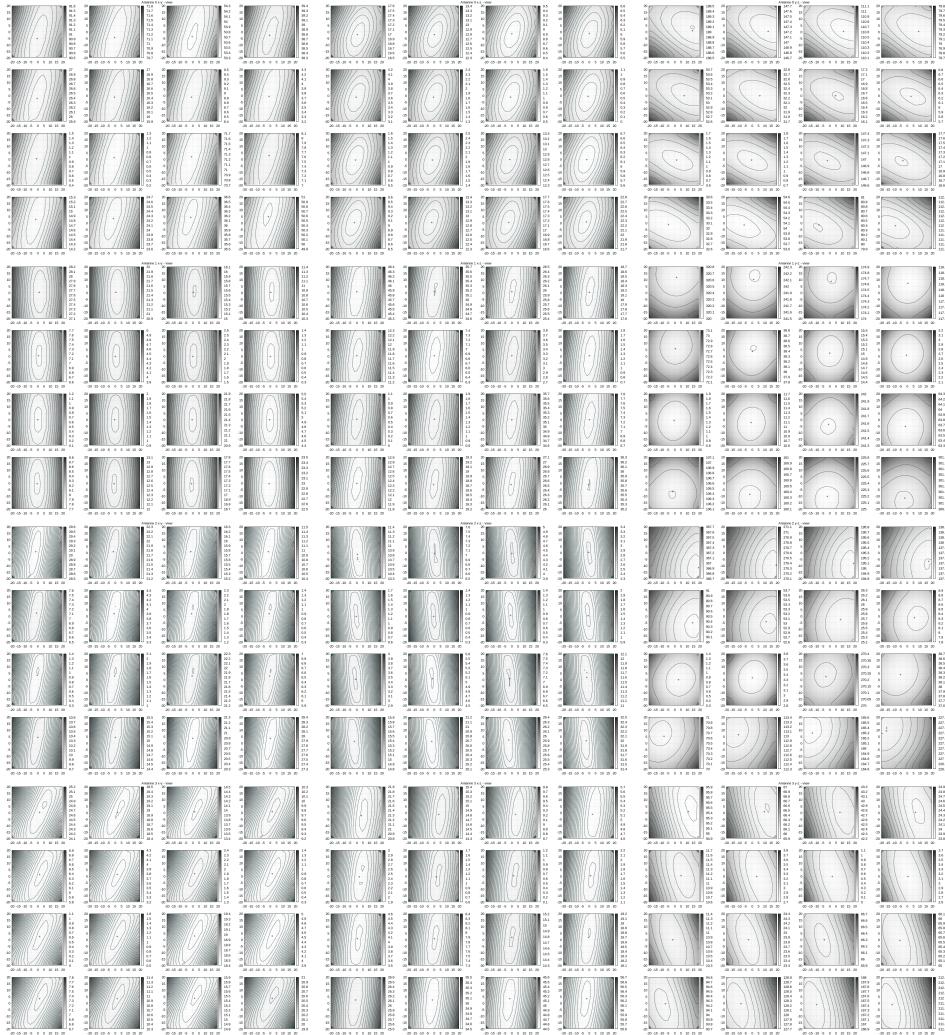
52
53 #print "local locallimit ",locallimit
54
55 if( a==3 ) plot inputfile u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):4 w lines
56   title "x" ls 1, \
57   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):5 w lines title "y" ls 2, \
58   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):6 w lines title "z" ls 3
59
60 if( a==7 ) plot inputfile u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):4 w lines
61   title "x" ls 1, \
62   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):5 w lines title "y" ls 2, \
63   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):6 w lines title "z" ls 3, \
64   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):7 w lines title "n0" ls 4, \
65   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):8 w lines title "n1" ls 4, \
66   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):9 w lines title "n2" ls 4, \
67   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):10 w lines title "n3" ls 4, \
68   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):11 w lines title "n4" ls 4, \
69   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):4 w lines title "x" ls 1, \
70   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):5 w lines title "y" ls 2, \
71   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):6 w lines title "z" ls 3
72
73 if( a==8 ) plot inputfile u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):7 w lines
74   title "n0" ls 4, \
75   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):8 w lines title "n1" ls 4, \
76   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):9 w lines title "n2" ls 4, \
77   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):10 w lines title "n3" ls 4, \
78   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):11 w lines title "n4" ls 4, \
79   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):12 w lines title "n5" ls 4, \
80   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):4 w lines title "x" ls 1, \
81   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):5 w lines title "y" ls 2, \
82   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):6 w lines title "z" ls 3
83
84 if( a==9 ) plot inputfile u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):7 w lines
85   title "n0" ls 4, \
86   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):8 w lines title "n1" ls 4, \
87   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):9 w lines title "n2" ls 4, \
88   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):10 w lines title "n3" ls 4, \
89   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):11 w lines title "n4" ls 4, \
90   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):12 w lines title "n5" ls 4, \
91   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):13 w lines title "n6" ls 4, \
92   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):4 w lines title "x" ls 1, \
93   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):5 w lines title "y" ls 2, \
94   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):6 w lines title "z" ls 3
95
96 if( a==10 ) plot inputfile u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):7 w lines
97   title "n0" ls 4, \
98   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):8 w lines title "n1" ls 4, \
99   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):9 w lines title "n2" ls 4, \
100  "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):10 w lines title "n3" ls 4, \
101  "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):11 w lines title "n4" ls 4, \
102  "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):12 w lines title "n5" ls 4, \
103  "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):13 w lines title "n6" ls 4, \
104  "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):14 w lines title "n7" ls 4, \
105  "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):4 w lines title "x" ls 1, \
106  "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):5 w lines title "y" ls 2, \
107  "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):6 w lines title "z" ls 3
108
109 set autoscale

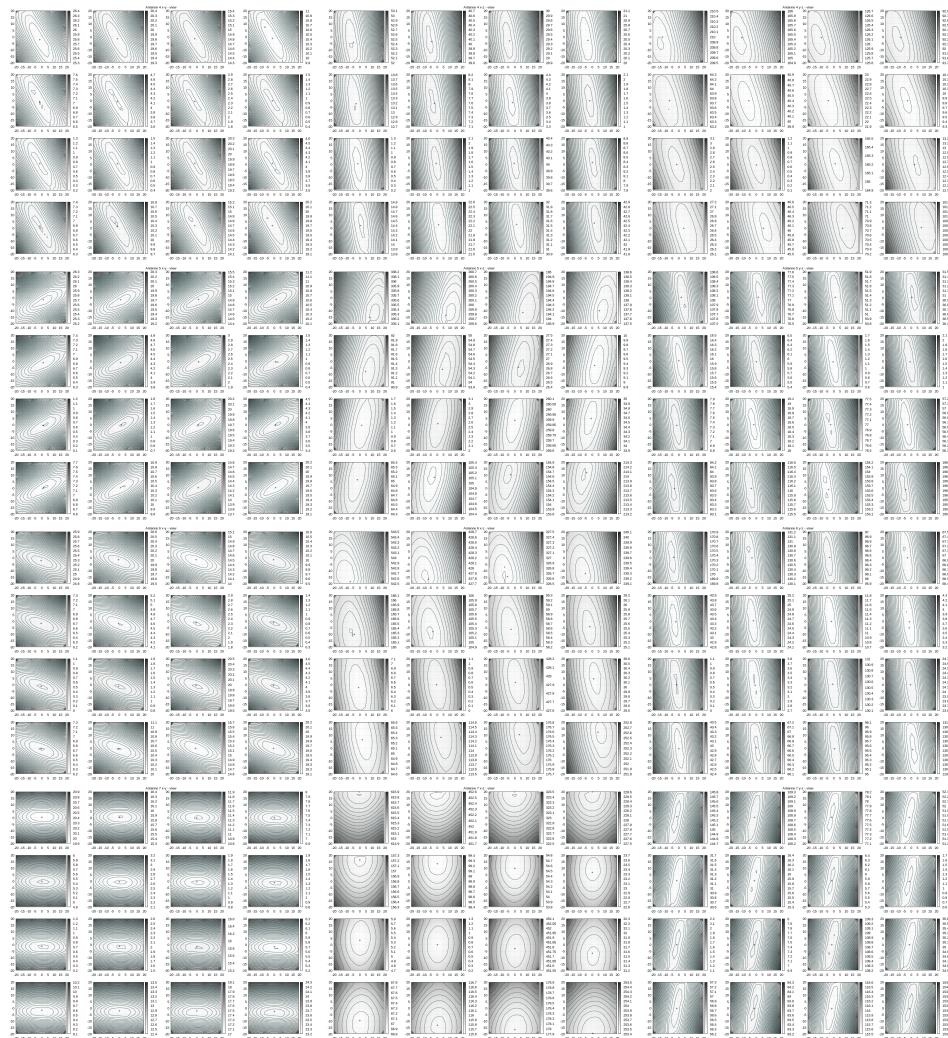
```

```
110
111 set ytics format "%.1e"
112 set logscale y
113 set xlabel ""
114 set ylabel "Function Value"
115 set size .5, .4
116 set yrange [1e-25:20000]
117 set origin .0,.0
118 plot inputfile u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):2 w lines ls 5 title "
    fitness"
119
120 set size .5, .4
121 set origin .5,.0
122 set autoscale
123 #set yrange [1e-10:2]
124 #set xrange [0:3500]
125 #set clip one
126 set ylabel "Sigma"
127
128 plot inputfile u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):lastDataCol w lines ls
    5 title "{/Symbol s}"
129
130 i=i+1
131
132 unset multiplot
133
134 if (i < m) reread
135 i=0
```


D. Fitness Plots

D.1. X-Y-Ebene





D.2. Scatterplot

Listing D.1: Gnuplot Scatterplot-Skript

```

1  # This script uses to generate a plot from the final values of the
2  # solutions for one antenna
3  #
4  #prerequisites set i, n and the number of antennas to proper values
5  #
6  at(file, row, col) = system( sprintf("awk -v row=%d -v col=%d 'NR ==
7  row {print $col}' %s", row, col, file) )
8  to(file, min, first, mean, third, max, row) = system( sprintf("echo %d
9  %e %e %e %e >> %s", row, min, first, mean, third, max, file) )
10 header(file) = system( sprintf("echo \"#Idx min first mean third max\""
11 >> %s", file) )
12 toScientific(file, min, first, mean, third, max, row) = system(
13   sprintf("echo %d %e %e %e %e >> %s", row, min, first, mean,
14   third, max, file) )
15 remove(file) = system( sprintf("rm %s", file) )
16 to2(file, value) = system( sprintf("echo 1 2 3 %s %s", value, file) )
17 echoStats(min, first, mean, third, max) = system( sprintf("echo %e %e
18 %e %e %e ", min, first, mean, third, max) )
19 unset style
20 set style line 1 linetype 1 linecolor rgb "#708090" linewidth 1
21   pointtype 7 pointsize .5
22 set style line 2 linetype -1 linecolor rgb "#2f4f4f" linewidth 1.2
23
24 set style line 3 linetype 1 linecolor rgb "#ee708090" linewidth 1.000
25   pointtype 7 pointsize .5 pointinterval 1
26 #set style line 3 linetype 1 linecolor rgb "red" linewidth 1.000
27   pointtype 7 pointsize 1 pointinterval 5
28 #set style line 4 linetype 1 linecolor rgb "gray" linewidth 1
29   pointtype 2 pointsize default pointinterval 0
30
31 set style arrow 1 heads size screen 0.008,90 ls 2
32
33 if( i == 0 ) set terminal pngcairo truecolor transparent background "#
34   ffffff" enhanced font "arial,10" size w, h
35
36 set style fill transparent solid 0.3 noborder
37 set key right bottom vertical Left noreverse enhanced box samplen .2
38 set key opaque
39 set grid
40
41 lastDataCol = 3+a+2
42 inputfile = "data/single_".i.".dat"
43 input_all = "data/single_".i.".dat"
44 input_one = "data/.i.".dat"
45
46 outMultiplot = "img/linien/kondensiert/scatter".i.".png"
47
48 #print "Processing: Start"
49
50 set output outMultiplot
51
52 set multiplot layout a,a
53
54 #collect information about the file
55 unset logscale
56 set autoscale
57 unset label
58 unset xlabel

```

```

49 | unset ylabel
50 |
51 | #
52 | #setup the 1. plot
53 | unset ytics
54 | unset xtics
55 |
56 | LABELX = sprintf("x" )
57 | LABELY = sprintf("y" )
58 | LABELZ = sprintf("z" )
59 | LABELN0 = sprintf("n0" )
60 | LABELN1 = sprintf("n1" )
61 | LABELN2 = sprintf("n2" )
62 | LABELN3 = sprintf("n3" )
63 | LABELN4 = sprintf("n4" )
64 | LABELN5 = sprintf("n5" )
65 | LABELN6 = sprintf("n6" )
66 | LABELN7 = sprintf("n7" )
67 |
68 | unset key
69 |
70 | xlabelpos = .1
71 | labelypos = .5
72 |
73 | # generate first row
74 | set label at graph xlabelpos,labelypos center LABELX front left font "
75 |   Arial,24" textcolor rgb "#4f2f2f"
76 | plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):5 ls 3 notitle
77 | unset label
78 |
79 | plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):6 ls 1 notitle
80 | plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):7 ls 1 notitle
81 | if(a>=4)plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):8 ls 1 notitle
82 | if(a>=5)plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):9 ls 1 notitle
83 | if(a>=6)plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):10 ls 1 notitle
84 | if(a>=7)plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):11 ls 1 notitle
85 | if(a>=8)plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):12 ls 1 notitle
86 | if(a>=9)plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):13 ls 1 notitle
87 | if(a>=10)plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):14 ls 1 notitle
88 | if(a>=11)plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):15 ls 1 notitle
89 |
90 | # 2.
91 | plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):5 ls 1 notitle
92 |
93 | set label at graph xlabelpos,labelypos center LABELY front left font "
94 |   Arial,24" textcolor rgb "#4f2f2f"
95 | plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):6 ls 3 notitle
96 | unset label
97 |
98 | plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):7 ls 1 notitle
99 | if(a>=4)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):8 ls 1 notitle
100 | if(a>=5)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):9 ls 1 notitle
101 | if(a>=6)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):10 ls 1 notitle
102 | if(a>=7)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):11 ls 1 notitle
103 | if(a>=8)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):12 ls 1 notitle
104 | if(a>=9)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):13 ls 1 notitle
105 |
106 | # 3.
107 | plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):5 ls 1 notitle
108 | plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):6 ls 1 notitle

```

```

109
110 set label at graph labelxpos ,labelypos center LABELZ front left font "
111   Arial ,24" textColor rgb "#4f2f2f"
112 plot inputFile u ($2 < limit ? $7: 1/0):7 ls 3 notitle
113 unset label
114
115 if(a>=4)plot inputFile u ($2 < limit ? $7: 1/0):8 ls 1 notitle
116 if(a>=5)plot inputFile u ($2 < limit ? $7: 1/0):9 ls 1 notitle
117 if(a>=6)plot inputFile u ($2 < limit ? $7: 1/0):10 ls 1 notitle
118 if(a>=7)plot inputFile u ($2 < limit ? $7: 1/0):11 ls 1 notitle
119 if(a>=8)plot inputFile u ($2 < limit ? $7: 1/0):12 ls 1 notitle
120 if(a>=9)plot inputFile u ($2 < limit ? $7: 1/0):13 ls 1 notitle
121 if(a>=10)plot inputFile u ($2 < limit ? $7: 1/0):14 ls 1 notitle
122 if(a>=11)plot inputFile u ($2 < limit ? $7: 1/0):15 ls 1 notitle
123
124 # 4.
125 if(a>3)plot inputFile u ($2 < limit ? $8: 1/0):5 ls 1 notitle
126 if(a>3)plot inputFile u ($2 < limit ? $8: 1/0):6 ls 1 notitle
127 if(a>3)plot inputFile u ($2 < limit ? $8: 1/0):7 ls 1 notitle
128
129 set label at graph labelxpos ,labelypos center LABELN0 front left font "
130   Arial ,24" textColor rgb "#4f2f2f"
131 if(a>=4)plot inputFile u ($2 < limit ? $8: 1/0):8 ls 3 notitle
132 unset label
133
134 if(a>=5)plot inputFile u ($2 < limit ? $8: 1/0):9 ls 1 notitle
135 if(a>=6)plot inputFile u ($2 < limit ? $8: 1/0):10 ls 1 notitle
136 if(a>=7)plot inputFile u ($2 < limit ? $8: 1/0):11 ls 1 notitle
137 if(a>=8)plot inputFile u ($2 < limit ? $8: 1/0):12 ls 1 notitle
138 if(a>=9)plot inputFile u ($2 < limit ? $8: 1/0):13 ls 1 notitle
139 if(a>=10)plot inputFile u ($2 < limit ? $8: 1/0):14 ls 1 notitle
140 if(a>=11)plot inputFile u ($2 < limit ? $8: 1/0):15 ls 1 notitle
141
142 # 5.
143 if(a>3)plot inputFile u ($2 < limit ? $9: 1/0):5 ls 1 notitle
144 if(a>3)plot inputFile u ($2 < limit ? $9: 1/0):6 ls 1 notitle
145 if(a>3)plot inputFile u ($2 < limit ? $9: 1/0):7 ls 1 notitle
146 if(a>4)plot inputFile u ($2 < limit ? $9: 1/0):8 ls 1 notitle
147
148 set label at graph labelxpos ,labelypos center LABELN1 front left font "
149   Arial ,24" textColor rgb "#4f2f2f"
150 if(a>=5)plot inputFile u ($2 < limit ? $9: 1/0):9 ls 3 notitle
151 unset label
152
153 if(a>=6)plot inputFile u ($2 < limit ? $9: 1/0):10 ls 1 notitle
154 if(a>=7)plot inputFile u ($2 < limit ? $9: 1/0):11 ls 1 notitle
155 if(a>=8)plot inputFile u ($2 < limit ? $9: 1/0):12 ls 1 notitle
156 if(a>=9)plot inputFile u ($2 < limit ? $9: 1/0):13 ls 1 notitle
157 if(a>=10)plot inputFile u ($2 < limit ? $9: 1/0):14 ls 1 notitle
158 if(a>=11)plot inputFile u ($2 < limit ? $9: 1/0):15 ls 1 notitle
159
160 # 6.
161 if(a>3)plot inputFile u ($2 < limit ? $10: 1/0):5 ls 1 notitle
162 if(a>3)plot inputFile u ($2 < limit ? $10: 1/0):6 ls 1 notitle
163 if(a>3)plot inputFile u ($2 < limit ? $10: 1/0):7 ls 1 notitle
164 if(a>4)plot inputFile u ($2 < limit ? $10: 1/0):8 ls 1 notitle
165 if(a>5)plot inputFile u ($2 < limit ? $10: 1/0):9 ls 1 notitle
166
167 set label at graph labelxpos ,labelypos center LABELN2 front left font "
168   Arial ,24" textColor rgb "#4f2f2f"
169 if(a>=6)plot inputFile u ($2 < limit ? $10: 1/0):10 ls 3 notitle
170 unset label
171
172 if(a>7)plot inputFile u ($2 < limit ? $10: 1/0):11 ls 1 notitle

```

```

169 | if(a>=8)plot inputfile u ($2 < limit ? $10: 1/0):12 ls 1 notitle
170 | if(a>=9)plot inputfile u ($2 < limit ? $10: 1/0):13 ls 1 notitle
171 | if(a>=10)plot inputfile u ($2 < limit ? $10: 1/0):14 ls 1 notitle
172 | if(a>=11)plot inputfile u ($2 < limit ? $10: 1/0):15 ls 1 notitle
173 |
174 | # 7.
175 | if(a>3)plot inputfile u ($2 < limit ? $11: 1/0):5 ls 1 notitle
176 | if(a>3)plot inputfile u ($2 < limit ? $11: 1/0):6 ls 1 notitle
177 | if(a>3)plot inputfile u ($2 < limit ? $11: 1/0):7 ls 1 notitle
178 | if(a>=4)plot inputfile u ($2 < limit ? $11: 1/0):8 ls 1 notitle
179 | if(a>=5)plot inputfile u ($2 < limit ? $11: 1/0):9 ls 1 notitle
180 | if(a>=6)plot inputfile u ($2 < limit ? $11: 1/0):10 ls 1 notitle
181 | set label at graph labelxpos ,labelypos center LABELN3 front left font
|   "Arial,24" textcolor rgb "#4f2f2f"
182 | if(a>=7)plot inputfile u ($2 < limit ? $11: 1/0):11 ls 3 notitle
183 | unset label
184 |
185 | if(a>=8)plot inputfile u ($2 < limit ? $11: 1/0):12 ls 1 notitle
186 | if(a>=9)plot inputfile u ($2 < limit ? $11: 1/0):13 ls 1 notitle
187 | if(a>=10)plot inputfile u ($2 < limit ? $11: 1/0):14 ls 1 notitle
188 | if(a>=11)plot inputfile u ($2 < limit ? $11: 1/0):15 ls 1 notitle
189 |
190 | # 8.
191 | if(a>=8)      plot inputfile u ($2 < limit ? $12: 1/0):5 ls 1 notitle
192 | if(a>=8)      plot inputfile u ($2 < limit ? $12: 1/0):6 ls 1 notitle
193 | if(a>=8)      plot inputfile u ($2 < limit ? $12: 1/0):7 ls 1 notitle
194 | if(a>=8)      plot inputfile u ($2 < limit ? $12: 1/0):8 ls 1 notitle
195 | if(a>=8)      plot inputfile u ($2 < limit ? $12: 1/0):9 ls 1 notitle
196 | if(a>=8)      plot inputfile u ($2 < limit ? $12: 1/0):10 ls 1 notitle
197 | if(a>=8)      plot inputfile u ($2 < limit ? $12: 1/0):11 ls 1 notitle
198 |
199 | if(a>=8)      set label at graph labelxpos ,labelypos center LABELN4
|   front left font "Arial,24" textcolor rgb "#4f2f2f"
200 | if(a>=8)      plot inputfile u ($2 < limit ? $12: 1/0):12 ls 3 notitle
201 | if(a>=8)      unset label
202 |
203 | if(a>=9)      plot inputfile u ($2 < limit ? $12: 1/0):13 ls 1 notitle
204 | if(a>=10)     plot inputfile u ($2 < limit ? $12: 1/0):14 ls 1 notitle
205 | if(a>=11)     plot inputfile u ($2 < limit ? $12: 1/0):15 ls 1 notitle
206 |
207 | # 9.
208 | if(a>=9)      plot inputfile u ($2 < limit ? $13: 1/0):5 ls 1 notitle
209 | if(a>=9)      plot inputfile u ($2 < limit ? $13: 1/0):6 ls 1 notitle
210 | if(a>=9)      plot inputfile u ($2 < limit ? $13: 1/0):7 ls 1 notitle
211 | if(a>=9)      plot inputfile u ($2 < limit ? $13: 1/0):8 ls 1 notitle
212 | if(a>=9)      plot inputfile u ($2 < limit ? $13: 1/0):9 ls 1 notitle
213 | if(a>=9)      plot inputfile u ($2 < limit ? $13: 1/0):10 ls 1 notitle
214 | if(a>=9)      plot inputfile u ($2 < limit ? $13: 1/0):11 ls 1 notitle
215 | if(a>=9)      plot inputfile u ($2 < limit ? $13: 1/0):12 ls 1 notitle
216 |
217 | if(a>=9)      set label at graph labelxpos ,labelypos center LABELN5
|   front left font "Arial,24" textcolor rgb "#4f2f2f"
218 | if(a>=9)      plot inputfile u ($2 < limit ? $13: 1/0):13 ls 3 notitle
219 | if(a>=9)      unset label
220 |
221 | if(a>=10)     plot inputfile u ($2 < limit ? $13: 1/0):14 ls 1 notitle
222 | if(a>=11)     plot inputfile u ($2 < limit ? $13: 1/0):15 ls 1 notitle
223 |
224 | # 10.
225 | if(a>=10)     plot inputfile u ($2 < limit ? $14: 1/0):5 ls 1 notitle
226 | if(a>=10)     plot inputfile u ($2 < limit ? $14: 1/0):6 ls 1 notitle
227 | if(a>=10)     plot inputfile u ($2 < limit ? $14: 1/0):7 ls 1 notitle
228 | if(a>=10)     plot inputfile u ($2 < limit ? $14: 1/0):8 ls 1 notitle
229 | if(a>=10)     plot inputfile u ($2 < limit ? $14: 1/0):9 ls 1 notitle

```

```

230 | if(a>=10)      plot inputfile u ($2 < limit ? $14: 1/0):10 ls 1 notitle
231 | if(a>=10)      plot inputfile u ($2 < limit ? $14: 1/0):11 ls 1 notitle
232 | if(a>=10)      plot inputfile u ($2 < limit ? $14: 1/0):12 ls 1 notitle
233 | if(a>=10)      plot inputfile u ($2 < limit ? $14: 1/0):13 ls 3 notitle
234 |
235 | if(a>=10)      set label at graph xlabelxpos ,label ypos center LABELN6
236 |           front left font "Arial,24" textColor rgb "#4f2f2f"
237 | if(a>=10)      plot inputfile u ($2 < limit ? $14: 1/0):14 ls 1 notitle
238 | if(a>=10)      unset label
239 |
240 | if(a>=11)      plot inputfile u ($2 < limit ? $14: 1/0):15 ls 1 notitle
241 |
242 | # Generate last row
243 | if(a>=11)      plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):5 ls 1 notitle
244 | if(a>=11)      plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):6 ls 1 notitle
245 | if(a>=11)      plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):7 ls 1 notitle
246 | if(a>=11)      plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):8 ls 1 notitle
247 | if(a>=11)      plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):9 ls 1 notitle
248 | if(a>=11)      plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):10 ls 1 notitle
249 | if(a>=11)      plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):11 ls 1 notitle
250 | if(a>=11)      plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):12 ls 1 notitle
251 | if(a>=10)      plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):13 ls 3 notitle
252 | if(a>=10)      plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):14 ls 1 notitle
253 |
254 | if(a>=11)      set label at graph xlabelxpos ,label ypos center LABELN7
255 |           front left font "Arial,24" textColor rgb "#4f2f2f"
256 | if(a>=11)      plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):15 ls 1 notitle
257 |
258 | i=i+1
259 |
260 | unset multiplot
261 |
262 | if ( i < m) reread
263 | i=0
264 |#print "rm ".ObjectiveOut.remove( ObjectiveOut )
265 |#print "rm ".SigmaOut.remove( SigmaOut )
266 |#print "rm ".FitnessOut.remove( FitnessOut )
267 |#print "rm ".EvalOut.remove( EvalOut )

```

Literaturverzeichnis

- [1] Evolution strategies – A comprehensive introduction. In: *Natural Computing* 1 (2002), Nr. 1, 3-52. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1015059928466>. – DOI 10.1023/A:1015059928466. – ISSN 1567–7818
- [2] BORGWERTH, Bernd ; GNIP, Christoph: Abschätzung der Wellenzahl durch Korrelation mit Kaliberpunkten. (2012)
- [3] BRONŠTEJN, I.N. ; SEMENDJAJEW, K.A. ; MUSIOL, G. ; MÜHLIG, H.: *Taschenbuch der Mathematik*. Deutsch Harri GmbH, 2012 <http://books.google.de/books?id=uPKPMAEACAAJ>. – ISBN 9783817120185
- [4] *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Radio Frequency Identification Equipment operating in the band 865 MHz to 868 MHz with power levels up to 2 W*. 2010
- [5] FINKENZELLER, K.: *RFID-Handbuch: Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC*. Hanser, 2008 <http://books.google.de/books?id=49HTBDrfqFUC>. – ISBN 9783446412002
- [6] GITHUB.COM: *GitHub — Repository Host*. <https://github.com>, 2013. – [Online, zuletzt geprüft am 30.4.2013]
- [7] HANSEN, Nikolaus: *Evolution Strategies and CMA-ES (Covariance Matrix Adaptation)*. <https://www.lri.fr/~hansen/gecco2013-CMA-ES-tutorial.pdf>. <https://www.lri.fr/~hansen/gecco2013-CMA-ES-tutorial.pdf>. – [Online, zuletzt geprüft am 30.7.2013]
- [8] HANSEN, Nikolaus: *Performance Evaluation of Anytime Blackbox Optimizers*. <https://www.lri.fr/~hansen/summer-school-performance-slides-final.pdf>. <https://www.lri.fr/~hansen/summer-school-performance-slides-final.pdf>. – [Online, zuletzt geprüft am 27.7.2013]
- [9] In: HANSEN, Nikolaus: *The CMA Evolution Strategy*. 2011
- [10] HANSEN, Nikolaus ; ROTH, Stefan:
- [11] HEESCH, Dimitri van: *Doxygen — Sourcecode documentation System*. <http://www.stack.nl/~dimitri/doxygen/>. <http://www.stack.nl/~dimitri/doxygen/>. – [Online, zuletzt geprüft am 7.5.2013]
- [12] HERMANN, M.: *Numerische Mathematik*. Oldenbourg Wissensch.Vlg, 2001 <http://books.google.de/books?id=6BvvAAAAMAAJ>. – ISBN 9783486255584

- [13] HERMANN, M.: *Numerische Mathematik*. Oldenbourg Wissensch.Vlg, 2001
<http://books.google.de/books?id=145jSrRdL7AC>. – ISBN 9783486579352
- [14] HTTP://WWW.FOEBUD.ORG/RFIDM: *Digitalcourage*. <http://www.foebud.org/rfid>, 2013. – [Online, zuletzt geprüft am 22.8.2013]
- [15] IGEL, Christian ; HEIDRICH-MEISNER, Verena ; GLASMACHERS, Tobias: Shark. In: *Journal of Machine Learning Research* 9 (2008), 993–996. http://image.diku.dk/shark/sphinx_pages/build/html/index.html
- [16] KNIPSCHER, Marius: *Planung eines Entwicklungstools für ein drahtloses 3D-Positionsmesssystem zur Lokalisierung von minimal invasiven chirurgischen Instrumenten*. FH-Gelsenkirchen. 2008
- [17] KOST, Bernd: *Optimierung mit Evolutionsstrategien*. Deutsch Harri GmbH, 2003 <http://books.google.de/books?id=FcgNJIg4lcAC>. – ISBN 9783817116993
- [18] KREUTZ, Martin ; SENDHOFF, Bernhard ; IGEL, Christian: *EALib: A C++ class library for evolutionary algorithms*. 2008. – Erstellt aus Quellcode
- [19] MUZALEWSKI, Mathäus: *Einsatz von Lernverfahren zur Interpolation von Positionsdaten eines RFID-basierten Navigationssystems*. 2011
- [20] OTTO GMBH & Co KG (Hrsg.): *Grundsätze*. http://www.otto.com/umwelt/umwelt_grundindex.html, Abruf: 5. Okt. 2004. – Einstiegsseite zum Unternehmensleitbild
- [21] PRESS, W.H.: *Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, 2007 <http://books.google.de/books?id=1aA0dzK3FegC>. – ISBN 9780521880688
- [22] RFIDJOURNAL.COM: *RFID-Journal*. <http://www.rfidjournal.com>, 2013. – [Online, zuletzt geprüft am 22.8.2013]
- [23] SIMO SÄRKÄ ; JAAKKOLA, Kaarle ; HUUSKO, Ville V. Viikari M.: Phase-Based UHF RFID Tracking With Nonlinear Kalman Filtering and Smoothing. (2012), February
- [24] WIKIPEDIA: *Kalman-Filter* — Wikipedia, The Free Encyclopedia. <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Kalman-Filter&oldid=116893284>. Version: 2013. – [Online; zuletzt editiert am 4-April-2013]
- [25] WIKIPEDIA: *Konzept des CMA-ES* — Wikipedia, The Free Encyclopedia. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Concept_of_directional_optimization_in_CMA-ES_algorithm.png&oldid=532567533. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Concept_of_directional_optimization_in_CMA-ES_algorithm.

- png&oldid=532567533. Version: 2013. – [Online; zuletzt geprüft am 2-Sep-2013]
- [26] WILLE, Andreas ; WINTER, Susanne: Medical Navigation Based on RFID Tag Signals: Model and Simulation. 55 (2010). <http://dx.doi.org/10.1515>. – DOI 10.1515
- [27] WINTER, Susanne: Ansätze zur Kalibrierung der Wellenzahl im RFID-Trackingsystem der Firma amedo. (2013)
- [28] ZURMÜHL, R. ; FALK, S.: *Matrizen und ihre Anwendungen für angewandte Mathematiker, Physiker und Ingenieure: Teil 2: Numerische Methoden*. Springer, 1986 (Matrizen und ihre Anwendungen / Rudolf Zurmühl, Sigurd Falk). <http://books.google.de/books?id=jN75e772xIQC>. – ISBN 9783540154747