

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

Department Electrical Engineering and Applied Sciences
Wesphalian University of Applied Sciences

February 2013

Entwurf

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 Methodes 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
Universitätsstraße 142
Bochum

Author: Christoph Gnip
Luggendelle 28
48954 Gelsenkirchen
Germany

Matrikelnummer: 200720362

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

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. mathematisches	2
1.2.1. Kondition	2
1.2.2. SVD	3
1.2.3. Evolutionäre Strategien	4
1.2.4. Evolutionsstrategien - Grundlagen	4
1.2.5. Strategien mit mehreren Populationen	7
1.2.6. Optimierungsräume	7
1.2.7. CMA-ES - Adaption der Kovarianzmatrix	8
1.2.8. Phase und Wellenzahl	9
1.3. technisches	10
1.3.1. RFID	10
1.3.2. Messsystem der Amedo GmbH	12
1.4. Anforderungen an die Lösung	13
1.5. Ziel und Herangehensweise	13
2. Hauptteil	15
2.1. Vorüberlegung zur Komplexität	15
2.2. Entwicklung des Modells	15
2.3. Erweiterte Betrachtung der Kondition	22
2.3.1. Weitere Anwendung der Konditionszahl	23
2.4. Realisierung der Kalibrierung	24
2.4.1. Implementation	24
2.4.2. Ergebnis	25
2.5. Betrachtung der Komplexität	26
2.6. Software	26
2.7. Hardware	27
3. Ergebnisse und Erkenntnisse	33
4. Diskussion	37
5. Schluss	39
5.1. Offene Punkte	39
5.2. Verbesserungen	39

5.3. Ausblick	40
A. Gnuplot Skripte	41
A.1. Boxplot	41
A.2. Lineplot	44
A.3. Scatterplot	46

Entwurf

Abbildungsverzeichnis

1.1. Ablauf Evolutionsstrategie	6
1.2. Zusammenhang Wellenlänge - Wellenzahl	9
1.3. Beispiele für Transponder und Lesegeräte	11
1.5. Messsystem der Amedo GmbH	12
1.6. Messaufbau der Amedo GmbH	12
2.1. Antennen-Szene mit einem Tag	16
2.2. Ergebnisse der Konditionsanalyse alle Permutationen	23
2.4. Ablauf der Kalibrierung	28
2.5. Ergebnisse der Evolutionären Kalibrierung	29
2.6. Statistisch verteilte Ergebnisse der Evolutionären Kalibrierung	30
2.7. Visualisierung des Kalibrierendergebnis	31
2.8. Kalibrierwerkzeuge	31

Entwurf

Tabellenverzeichnis

2.1. Finale Antennen Koordinaten 25

Entwurf

Entwurf

Listings

A.1. Gnuplot Boxplot-Skript	41
A.2. Gnuplot Lineplot-Skript	44
A.3. Gnuplot Scatterplot-Skript	46

Verwendete Abkürzungen

Folgende Abkürzungen in dieser Arbeit verwendet

- ES Evolutionäre Strategie (*Evolutionary Strategy*)
- CMA-ES Covariance Matrix Adaption - Evolutionary Strategy
- C++11 Programmiersprache C++ in der Version 11

RFID Radio-Frequency Identification LOS Line of Sight

Entwurf

Verwendete Symbole

Folgende Nomenklatur und Symbole werden in dieser Arbeit verwendet

- k ist der Index der Antennen im Aufbau verwendeten Antennen
- Matrizen werden mit fetten Großbuchstaben notiert (bspw. **A**)
- Vektoren werden mit fetten Kleinbuchstaben notiert (bspw. **b**)
- $r_k :=$ Abstand vom Tag zur Antenne
- $d_{k0} :=$ Abstand zur Landmarke
- **0** := Nullvektor
- $\mu :=$ Eigenwert; Es wird von dem gebräuchlicheren Symbol λ abgewichen, um Mehrdeutigkeiten im Rahmen der Arbeit zu vermeiden.

Entwurf

1. Einleitung

Dieses Kapitel führt in die Arbeit ein. Zuerst wird die Motivation erläutert und der aktuelle Stand der Technik vorgestellt, im Anschluss werden in zwei Teilen die technischen und mathematischen Voraussetzungen beschrieben, zuletzt werden daraus die Anforderungen an die Lösung abgeleitet. Die Voraussetzungen werden in der für das Verständnis dieser Arbeit angebrachten Tiefe beschrieben. Allgemeine Zusammenhänge und Techniken, denen einen großer Stellenwert in dieser Arbeit zukommt, werden zusammengefasst präsentiert. Für detaillierte Beschreibungen wird auf entsprechende Fachliteratur verwiesen. Abschließen wird das Ziel dieser Arbeit aufgestellt.

1.1. Motivation

Die Positionsbestimmung mittels RFID ist eine vielversprechende Technik. Die Bestimmung der Position (im Folgenden "Tracking" genannt) mittels RFID bietet gegenüber vergleichbaren Methoden (z.B. Ultraschall, Optisch) verschiedene Vorteile. Das wesentlichste Unterscheidungsmerkmal ist, dass keine direkte Sichtlinie sog. LOS notwendig ist um ein Objekt zu lokalisieren. Der Grund dafür ist das zugrunde liegende Messprinzip. Es werden elektromagnetische Signale ausgewertet, die anderen Wechselwirkungen unterliegen und somit Materie durchdringen. Insbesondere im Vergleich mit optischen Verfahren ist RFID damit überlegen. Die Eigenschaft Materie zu durchdringen erlaubt es Tags im Patienten zu lokalisieren, entsprechende Untersuchungen über die Positionsgenauigkeit im Körper sind vielversprechend.[REFERENZEN]

Auf den Tags können zusätzliche Informationen hinterlegt werden, beispielsweise eine Identifikationsnummer oder Ähnliches. Dadurch wächst das Anwendungsspektrum weiter[REFERENZEN]. Das Auslesen von zusätzlichen Informationen ist mit keiner der anderen Technologien möglich.

Das von dem Messsystem der Amedo GmbH verwendete Verfahren basiert auf der Messung der Phasenlage der Antwort eines Tags. Die Phasenlage ist direkt proportional zu einer Entfernung, sie ist jedoch nicht Eindeutig (siehe 1.3.1)

Aufgrund des zufälligen Charakters der Störungen ist eine analytische Lösung des Problems sehr schwierig und bisher nicht gelungen. Andere Ansätze scheiterten an der Komplexität des Problems¹ oder benötigen sehr aufwändige Messreihen mit großer Anzahl an Messpunkten [1]. Das limitiert die Praxistauglichkeit der Verfahren.

Traditionell werden Probleme dieser Klasse mit Methoden der Statistik und Numerik behandelt. Ein Teilgebiet der Numerik stellen evolutionäre Berechnungsverfahren dar.

¹siehe 2.1 und 2.5

Diese sind für die Klasse von In dieser Arbeit soll mittels Evolutionärer Verfahren die beschriebenen Probleme zu gelöst werden. Im Endergebnis soll dabei eine Abschätzung der Wellenzahl ?? möglich sein.

1.2. Mathematische Voraussetzungen

Dieser Abschnitt behandelt die mathematischen Voraussetzungen für diese Arbeit.

1.2.1. Kondition

Gegeben ist ein lineares Gleichungssystem der Form:

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

Eine numerische Lösung für in der Regel zu einer von $\mathbf{0}$ verschiedenen Lösung 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.

Aus $\mathbf{Ax} - \mathbf{b} = \mathbf{0}$ und $\mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{b} = \mathbf{r}$ folgt

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

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 Spektralnorm²:

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

Die Symbole μ_{\max} und μ_{\min} stehen für die Eigenwerte des Systems. Nach [9] kann man folgende Aussage über die Konditionszahl treffen:

²<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Spektralnorm&oldid=118988565>

"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."

1.2.2. 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 bestimmbar. 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 $\mathbf{\Sigma}$ mit Werten ≥ 0 und einer dritten adjungierten $N \times N$ -Matrix \mathbf{V}^* , so ergibt sich:

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

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

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

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

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. [16]. Diese Implementation wird durch den Erwerb der entsprechenden Lizenz im Rahmen dieser Arbeit verwendet.

Weiter Informationen zum Verfahren sind in [2, Kapitel 4.6.3] zu finden.

1.2.3. Evolutionäre Strategien

Folgende Information entstammen im Wesentlichen aus [13],[2] sowie [7] und sind auf den folgenden Seiten lediglich zusammengefasst und neu arrangiert um eine Einarbeitung in die Thematik zu ermöglichen.

1.2.4. 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.

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 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 $X_p = \{\mathbf{x}_{p_1}^k, \dots, \mathbf{x}_{p_\mu}^k\}$

Anmerkung: 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.

Mutation

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

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

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 Standardabweichung σ_i bestimmt.

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.

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

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.

Evolutionalgorithmus

Der eigentliche Evolutionalgorithmus ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Er enthält im wesentlichen die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Schritte. Der prinzipielle Ablauf ist für alle Evolutionalgorithmen 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 setzten 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 Elterngeneration darstellt. Dieser Mechanismus soll verhindern, dass die Eltern, nach einer gewissen Anzahl an Generationen, nicht mehr berücksichtigt werden.

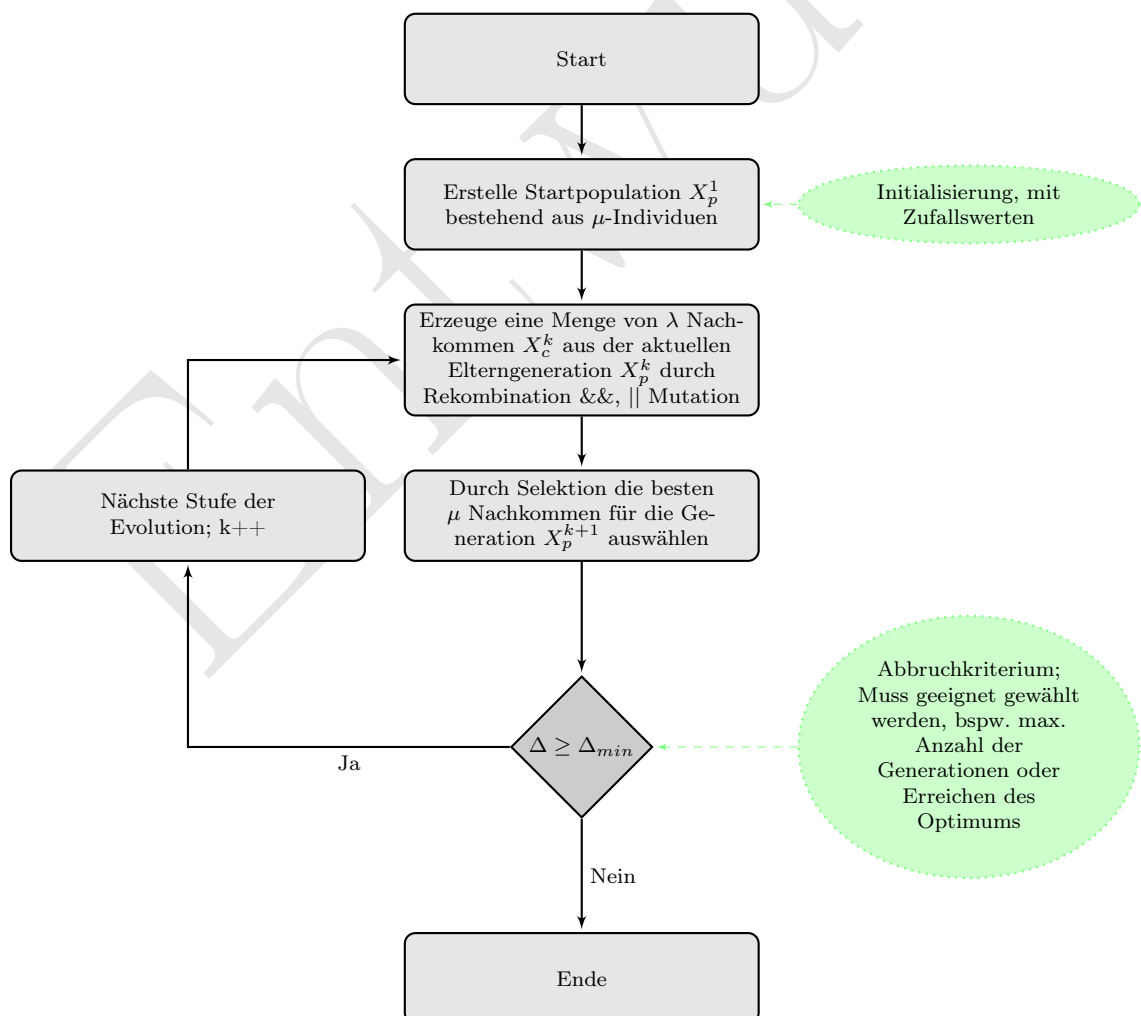
Wird die Rekombination eingesetzt kann auch die Anzahl der beteiligten Elternelemente angegeben werden:

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

Mithilfe der hier beschriebenen 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.

Abbildung 1.1.: Der Prinzipielle Ablauf des (λ, μ) -Evolutionalgorithmus.



1.2.5. 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.

1.2.6. 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, 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.

Diskrete Optimierung

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.

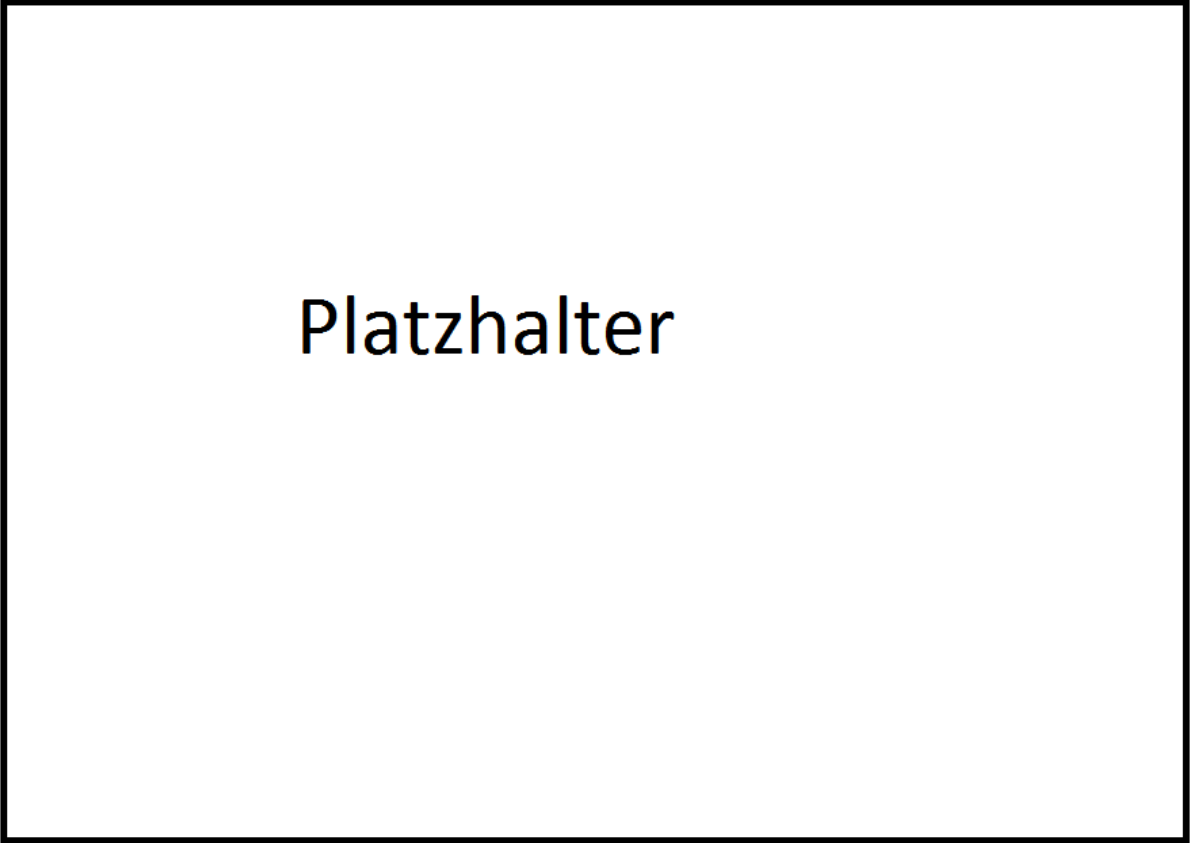
Gemischte Optimierung

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.

1.2.7. CMA-ES - Adaption der Kovarianzmatrix

Dieses Verfahren stellt den "State of the Art"- der Evolutionären Berechnungsverfahren dar. Für spezialisierte Probleme gibt es einige bessere Lösungen, als allgemeiner Solver hingegen ist dieses Verfahren mehr als tauglich. Es wurde um die Jahrtausendwende entwickelt und veröffentlicht. Es wurde verschiedene Abwandlungen des Algorithmus vorgestellt und sogar eine Lösung zur Multiobjekt-Optimierung existiert. 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, quelloffene Software, die am Institut für Neuroinformatik der Ruhr Universität Bochum entwickelt wird. Detailliert wird Shark im Rahmen des Hauptteils, in Abschnitt ?? vorgestellt.

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

1.2.8. Phase und Wellenzahl

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.

1.3. Technische Voraussetzungen

In diesem Abschnitt werden die technischen 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.

1.3.1. 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 [17] 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 [3] 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 [11]. Die Seiten der Kampagne bieten eine sehr weitgehende Auflistung der Anwendungen für RFID. Ziel der Kampagne ist es die Gefahren in den gesellschaftlichen Fokus zu rücken und für den Umgang mit der allgegenwärtigen Technik zu sensibilisieren. Die Kampagne über sich selbst:

"Wir wollen RFID nicht komplett verhindern. Es geht uns nicht darum, die RFID-Entwicklung zum Erliegen zu bringen ... Im Gegenteil." ³

1. 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-Frequenzen⁴ (865,5?867,5 MHz) kann man die Wellenlänge mit: $\lambda \simeq 0,35m$ angeben. Daraus folgt, dass alle 35 cm die gleiche Konfiguration der Phase vorliegt. Im Rahmen dieser Arbeit wird dabei von *Isophasen* gesprochen. Die gewonnene Information aus der Phase ist nicht eindeutig, d.h. es lässt sich durch die Kenntnis der Phase nicht unmittelbar auf die korrekte Position schließen. Man kann das Problem umgehen in dem man auf die errechnete Position ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge addiert. Die sog. Wellenzahl (siehe (??)).

³<http://www.foebud.org/rfid/was-kann-ich-tun/>

⁴insert reference here

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 Mobilien 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

2. 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 unbestimmte 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.
3. In realen Umgebungen treten zusätzlich noch Rufflektionen 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.

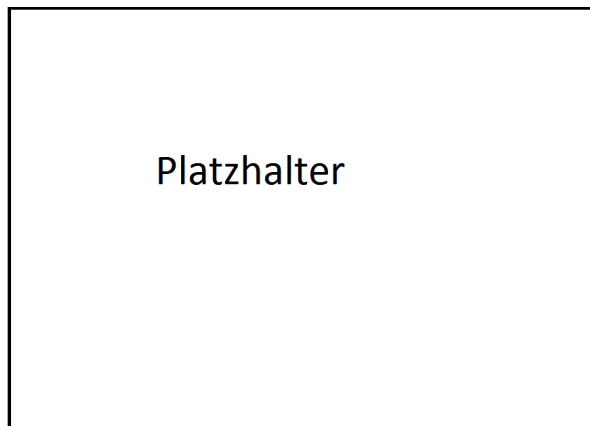


Abbildung 1.5.: Das Bild zeigt das PRPS-Messsystem zu erkennen sind die wesentlichen elektronischen Komponenten, sowie weitere periphere Hardware

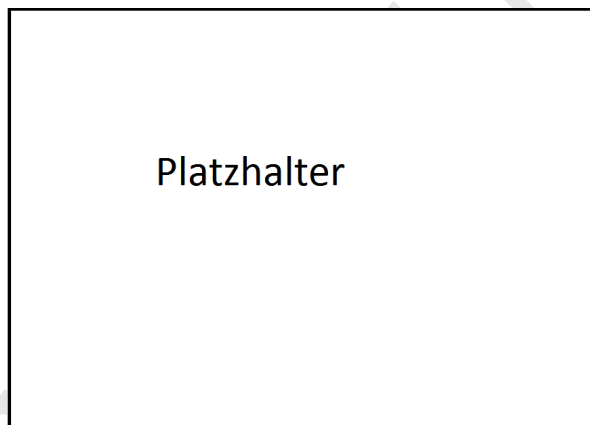


Abbildung 1.6.: Abgebildet ist der Messaufbau mit unterschiedlichen Antennen

1.3.2. Messsystem der Amedo GmbH

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.

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.

1.4. 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- Kalibrierpunkten
3. Eindeutigkeit der Lösung
4. Eignung für ein großes Messvolumen
5. Nahtlose Integration in das bestehende Software Ökosystem

1.5. Ziel und Herangehensweise

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Systems zur Ermittlung der Wellenzahl. Gleichzeitig sollen die oben abgeleiteten Anforderungen erfüllt werden. Das System wird im Kern die Lösung über numerische Verfahren finden, im speziellen kommt das sog CMA-ES zum Einsatz. Dazu wird zuerst ein Modell entworfen werden, dass sich für dieses Verfahren eignet. Das Modell soll mit möglichst wenig Annahmen/ Einschränkungen auskommen und dennoch ein relativ sicheres, reproduzierbares Ergebnis liefern. Das System soll unmittelbar in den Produkten der Amedo GmbH zum Einsatz kommen können. Darüber hinaus soll im Rahmen dieser Arbeit eine Methode entwickelt werden, um die Position von frei im Raum angeordnete Antennen zu ermitteln.

Entwurf

2. Hauptteil

Im Folgenden werden ausführlich die Lösungen zur beschriebenen Problemstellung präsentiert. Es werden die Modelle vorgestellt die zum Auffinden der Lösung verwendet wurden, Im Anschluss wird die weiterhin wird die Implementation der ES und die Schnittstellen zum PRPS beschrieben.

2.1. Vorüberlegung zur Komplexität

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.

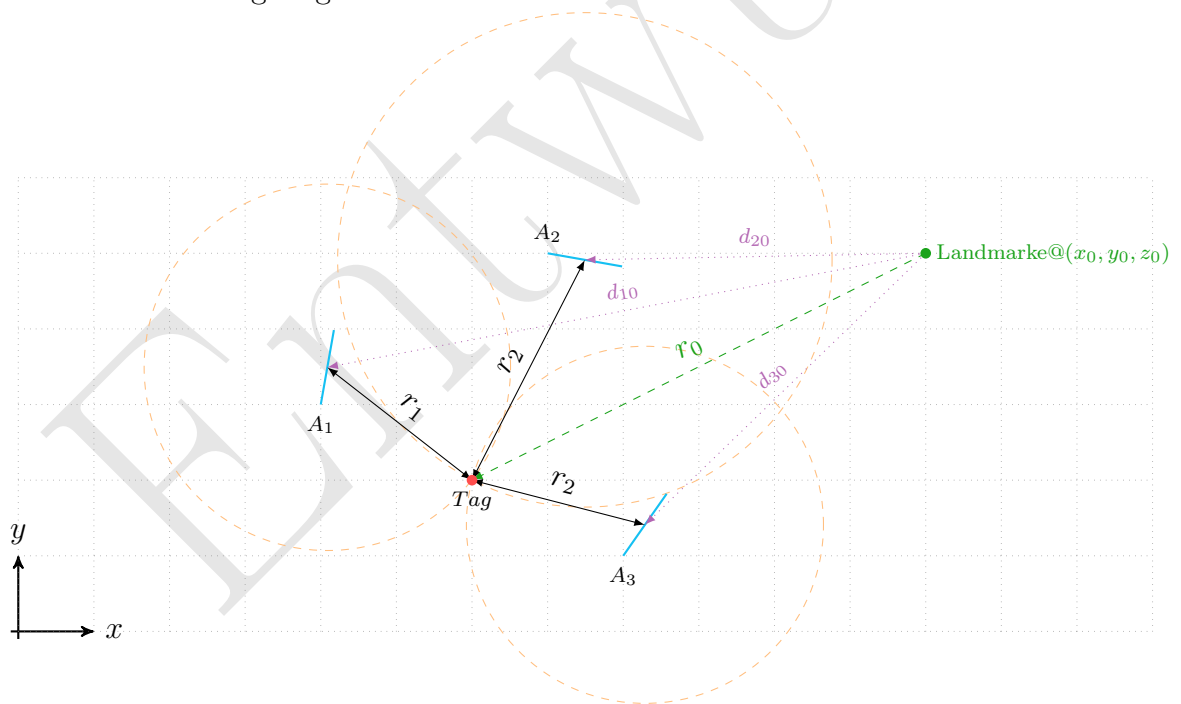
Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit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

2.2. Entwicklung des Modells

Im folgenden Abschnitt wird das Modell für die Lösung des Zusammenhangs entwickelt. Zur Veranschaulichung des Sachverhalts dient die Abbildung 2.1. 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
- $d_{k,J}$:= Abstand zur Landmarke

Abbildung 2.1.: 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 eine 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.



- $N_0 :=$ 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 Position (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 [?]. Der Messaufbau der Amedo GmbH erlaubt die Verwendung von mehr als 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 $(x, y, z - \text{Koordinaten})$ bekannt, bzw. wurden durch Kalibrierung 2.4 in einem vorherigen Schritt bestimmt. Wir können zusätzlich zu notieren:

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

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

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:

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

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:

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

Vergleich von (2.4) mit (2.2) bringt:

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

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

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 2.4). 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:

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

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

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

Führen wir nun:

$$a_{0k} := \frac{1}{2} d_{kj}^2$$

$$a_1 := \frac{\lambda^2}{8}$$

$$a_2 := a_1 \frac{1}{\pi}$$

$$a_{3kj} := a_1 \frac{1}{(2\pi)^2} (\varrho_j^2 - \varrho_k^2)$$

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 durchgeführten 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:

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

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:

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

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 kann. Das Modell erlaubt, dass die Anzahl der Antennen variieren kann. Damit ist das Modell uneingeschränkt tauglich für den Einsatz in dem PRPS-Messsystem. Abschließend soll das bisher verwendete Modell umgeschrieben werden, damit die Allgemeingültigkeit darin enthalten ist.

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

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

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

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 und eine 1×10 Matrix. 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. Erweiterte Betrachtung der Kondition

Die vorgestellte erweiterte Form des Modells erleichtert Implementation und Verifikation. Große Teile des Modells sind statisch (vgl. 2.21) und können im Voraus berechnet werden. 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. Dazu wird untersucht inwieweit die Zerlegung in Blockmatrizen und die Untersuchung der Kondition dieser eine Abschätzung der vollständigen Konditionszahl im Allgemeinen darstellt.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{Z} & \mathbf{P} & \mathbf{V} \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Dabei ist:

$$\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \quad \mathbf{P} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \quad \mathbf{V} \in \mathbb{R}^{4 \times 3} \quad (2.22)$$

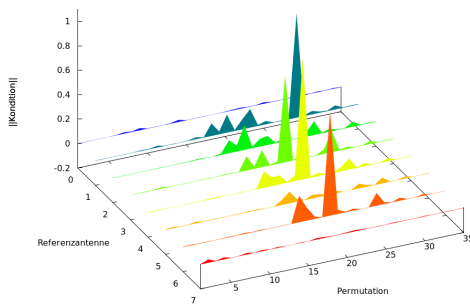
Die Matrizen \mathbf{Z} und \mathbf{P} sind statisch. Hingegen enthält die Matrix \mathbf{V} die gemessenen Phasenwerte Θ_k der Antennen für diese Konfiguration.

Die Abbildung 2.2 zeigt die bereits angestellte Untersuchung zu dieser Überlegung. Abbildung 2.3a stellt die Konditionszahl der rein geometrischen 3×3 -Matrix dar. In der Abbildung 2.3b sehen wir die Kondition der erweiterten Matrix. Neben der geometrischen

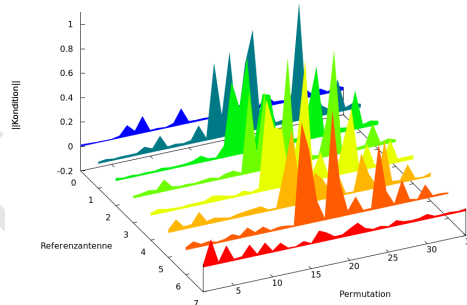
sind auch die beiden anderen Blockmatrizen in diese Konditionsbetrachtung eingeflossen. Als zusätzliche Angabe wird ist sind die Skalierungsfaktoren angegeben. Legt man beide Grafiken übereinander erkennt man:

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 2.2.: 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 vorkommenden Wert (= 257, 13); In dieser Konfiguration sind die Konstanten (a_1 & a_2) sowie die variablen, gemessenen 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 ?? weiter beschrieben.

2.3.1. 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 optimieren. Ziel der Optimierung wäre es durch eine geeignete Positionierung der Antennen, die Anzahl der Antennenpermutationen mit kleiner Konditionszahl zu maximieren.

2.4. Realisierung der Kalibrierung

In diesem Abschnitt wird die Implementierung der Kalibrierung des Messaufbaus und die Ergebnisse beschrieben. 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.

2.4.1. Implementation

Der Ablauf der Kalibrierung ist in Abbildung 2.4 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, die von den beteiligten Softwarekomponenten ausgeführt werden. Es wurden im Rahmen der Arbeit zwei unterschiedliche Wege implementiert, ein Ergebnis für die Kalibrierung zu berechnen. Diese Wege werden nun kurz vorgestellt. Und die Ergebnisse miteinander verglichen. Die Präsentation der Resultate wird auch dazu verwendet werden, die gewählte Form der Diagramme zu erläutern. Diese werden in den Ergebnissen des komplexeren Modells ebenfalls verwendet.

SVD

Das unter 1.2.2 vorgestellte Verfahren der Singular-Value-Decomposition kann dazu verwendet werden, eine Lösung eines Gleichungssystems zu berechnen. Das Modell, das zur Kalibrierung verwendet wird, ist ein Gleichungssystem der Form $\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x}$ 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 2.1 und in Abbildung 2.7 gezeigt. Die Implementation des Algorithmus stammt aus [16] und wurde für diese Arbeit angeschafft.

CMA-ES

Das über den evolutionären Algorithmus gefundene Ergebnis gleicht dem des SVD-Verfahrens. Der SVD-Algorithmus ist um ein vielfaches effizienter 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.

Der erste Punkt kommt im Rahmen dieser Arbeit eine besondere Stellung zu, es ist einfacher anhand dieses Übersichtlichen Problems (mit nur drei Unbekannten) den Ablauf des Algorithmus sowie die Visualisierung der Ergebnisse besser zu erläutern. Die verwendete Darstellung gleicht der, die später bei dem Komplexeren Modell Verwendung findet.

2.4.2. 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 2.7. Eine Berechnung

Antenne	x	y	z
1	0.479	-1.012	0.60
2	-0.77	-1.04	1.34
3	1.52	-1.05	1.37
4	-0.92	-0.19	1.32
5	1.92	0.03	1.39
6	-0.55	1.09	1.43
7	1.06	1.07	1.35
8	0.45	1.35	0.67

Tabelle 2.1.: Tabelle der Finalen Antennenkoordinaten, berechnet mit dem in dieser Arbeit entwickelten Modell und dem SVD-Verfahren

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 und.

2.5. Betrachtung der Komplexität

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.

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.

2.6. Software

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.

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 pellentesque 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.

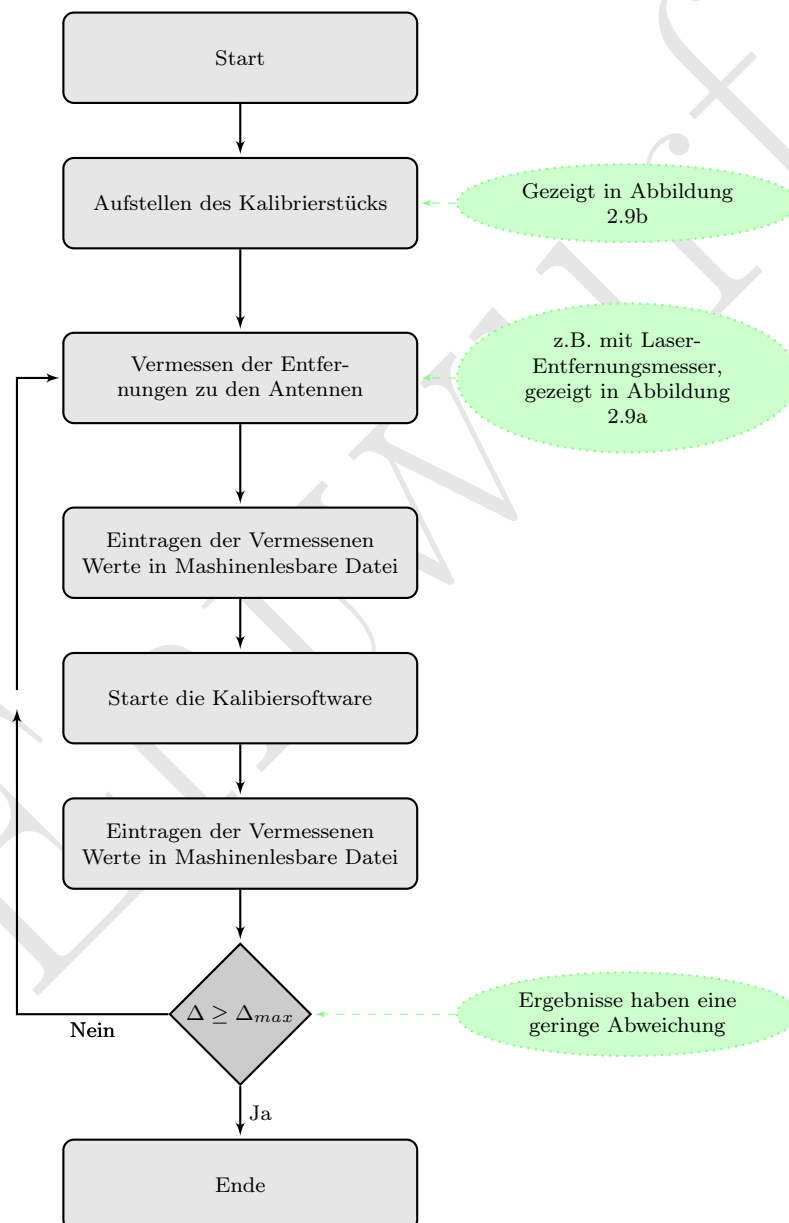
2.7. Hardware

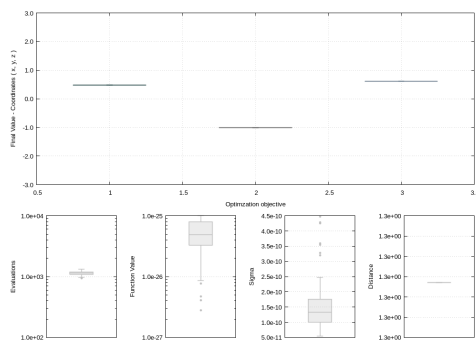
Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus 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.

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.

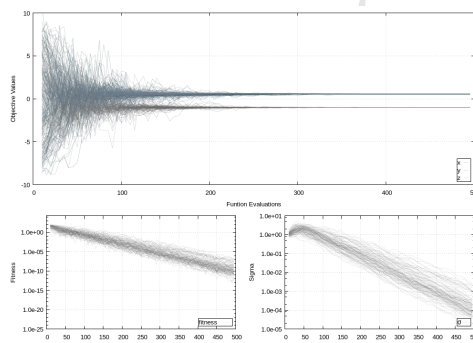
Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas 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.

Abbildung 2.4.: Ablauf der Kalibrierung

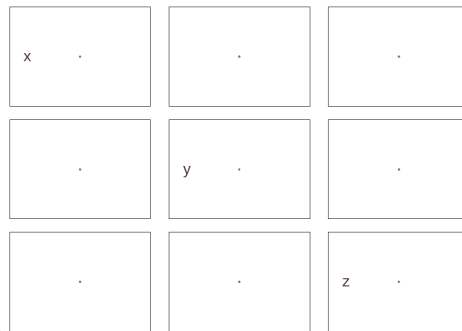




(a) lorem

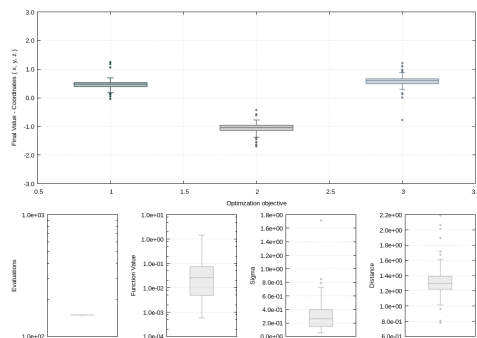


(b) lorem

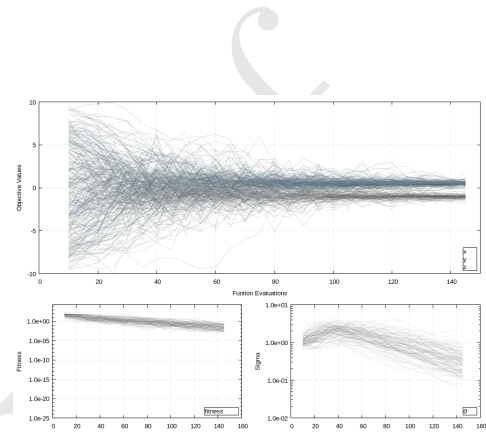


(c) lorem

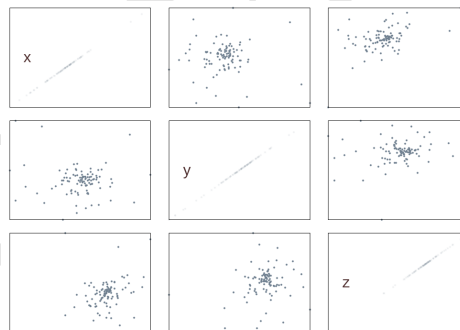
Abbildung 2.5.: Ergebnisse der evolutionären Kalibrierung. Es wurden insgesamt 100 Durchläufe des Algorithmus erstellt. In (a) wird der Endwert einer jeden Lösung gezeigt, Dabei werden oberes und unteres Quartil sowie der Mittelwert mit Hilfe von Boxen dargestellt; (b) zeigt den Verlauf der drei Objektvariablen aller Durchläufe sowie die Entwicklung der Fitness und das mittlere Sigma. Das Abbruchkriterium war eine Fitness von $\leq 10^{-25}$. Die Fähnchen der Boxen, stellen die maximal- bzw. minimal-Werte dar. Die Große enthält der obere und untere Quartil der Daten, der Strich in der Box zeigt den Mittelwert aller Lösungen.



(a) Statistisch verteilte Endwerte für die Koordinaten der Kalibrierung. Die Werte für x, y , und z haben noch nicht ihren Endwert erreicht.



(b) lorem



(c) lorem

Abbildung 2.6.: Analog zu der Abbildung 2.5 zeigen die Plots die gleichen Darstellungen. Diese zeigt, 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. 2.5b).

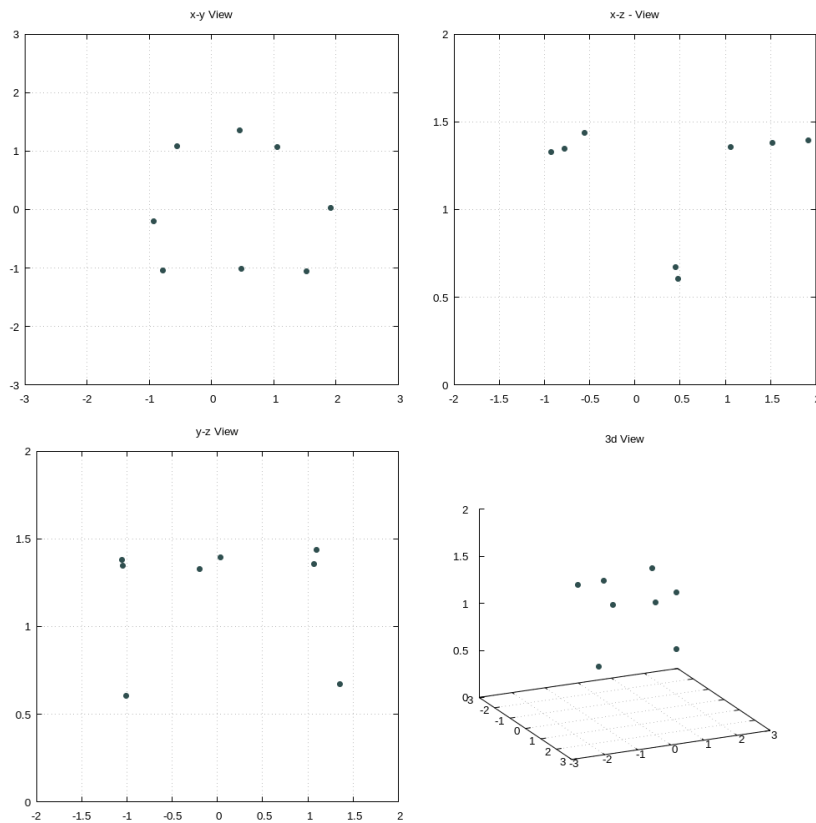
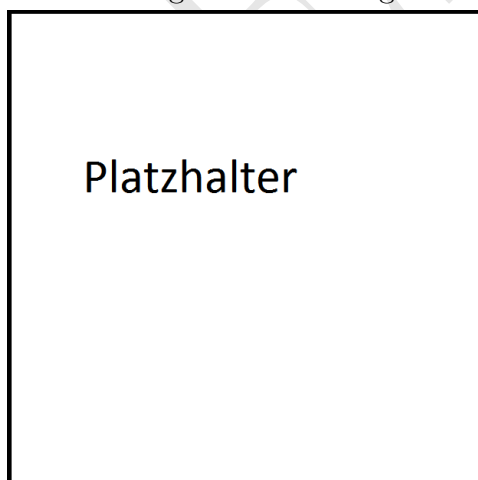
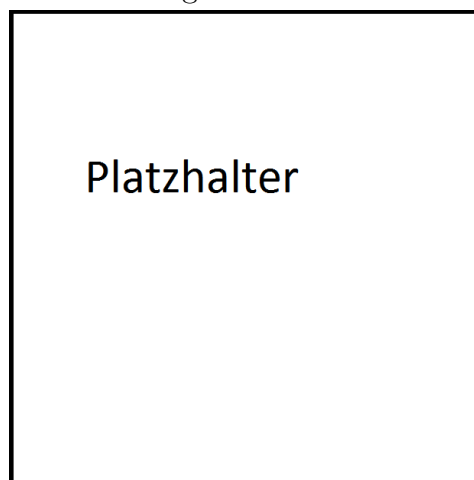


Abbildung 2.7.: Visualisierung des Kalibrierendergebnis. Abgebildet sind die gefundenen Antennenkoordinaten (Punkte) in drei Raumansichten. Die zusätzliche, dreidimensionale Ansicht dient der Übersicht.

Abbildung 2.8.: Werkzeuge die bei der Kalibrierung verwendet werden.



(a) Laser Entfernungsmesser der Fa. Bosch



(b) Kalibrierstück, verwendet zum Einmessen des Antennenaufbaus

Entwurf

3. Ergebnisse und Erkenntnisse

In diesem Kapitel wird die Implementation verifiziert, dafür wird die analytische Lösung für die Kalibrierung der Antennenposition der Lösung des CMA-ES-Verfahrens verglichen. Im Anschluss werden die Ergebnisse das Auffinden der Wellenzahl präsentiert. 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.

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 pellentesque 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 sem-

per, 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.

Entwurf

Entwurf

4. Diskussion

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.

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 pellentesque 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.

Entwurf

5. Schluss

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.

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. Offene Punkte

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.

5.2. Verbesserungen

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.

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.

5.3. Ausblick

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.

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.

A. Gnuplot Skripte

A.1. Boxplot

Listing A.1: Gnuplot Boxplot-Skript

```
1  set style line 1 linetype 1 linecolor rgbcolor "#2f4f4f" linewidth 1.5 pointtype 7 pointsize
2  .5 pointinterval 1
3  set style line 2 linetype 1 linecolor rgbcolor "#696969" linewidth 1.5 pointtype 7 pointsize
4  .5 pointinterval 1
5  set style line 3 linetype 1 linecolor rgbcolor "#708090" linewidth 1.5 pointtype 7 pointsize
6  .5 pointinterval 1
7  set style line 4 linetype 1 linecolor rgbcolor "#bebebe" linewidth 1.5 pointtype 7 pointsize
8  .5 pointinterval 1
9  if( i == 0 ) set terminal pngcairo truecolor transparent background "#ffffff" enhanced font "
10 arial,10" size w, h
11
12 set style fill transparent solid 0.3 noborder
13 #set style boxplot outliers pointtype 19
14 #set style data boxplot
15 #set key right bottom vertical Left noreverse enhanced box sample .2
16 #set key opaque
17 set grid
18
19 #in this column we find the Data for sigma
20 lastDataCol = 3+a+2
21 #int this column we expect the vector
22 vectorCol = 3+a+3
23 inputfile = "data/single_".i.".dat"
24 outMultiplot = "img/boxen/kondensiert/".i.".png"
25
26 set output outMultiplot
27 set multiplot layout 1,3
28 unset logscale
29 set autoscale
30 unset label
31
32 #
33 #setup the 1. plot
34 set style data boxplot
35 set xlabel "Optimization objective"
36 set ylabel "Final Value - Coordinates ( x, y, z )"
37
38 set size 1, .6
39 set origin .0,.4
40 set autoscale
41 set xrange [.5:a+.5]
42 set xtics
43
44 set ytics format "%.1f"
45 set yrange [-3:3]
46 if(a>3) set y2tics format "%.1f"
47 if(a>3) set y2label "Final Value - Wavenumbers ( n )"
48
49 print "a=",a
50 if(a==3) plot inputfile u (1):5 ls 1 axes xly1 notitle, \
51 '' u (2):6 ls 2 axes xly1 notitle, \
52 '' u (3):7 ls 3 axes xly1 notitle
53 if(a==3) unset y2tics
54 if(a==3) unset y2label
55
56 if(a==6) plot inputfile u (1):5 ls 1 notitle, \
57 '' u (2):6 ls 2 notitle, \
58 '' u (3):7 ls 3 notitle, \
59 '' u (4):8 ls 4 notitle, \
60 '' u (5):9 ls 4 notitle, \
61 '' u (6):10 ls 4 notitle
62
63 if(a==7) set xtics ("x" 1, "y" 2, "z" 3, "n0" 4, "n1" 5, "n2" 6, "n3" 7) scale 0.0
64 if(a==7) plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):5 ls 1 axes xly1 notitle, \
```

```

62      '' u ($2 < limit ? (2): 1/0):6 ls 2 axes xly1 notitle, \
63      '' u ($2 < limit ? (3): 1/0):7 ls 3 axes xly1 notitle, \
64      '' u ($2 < limit ? (4): 1/0):8 ls 4 axes xly2 notitle, \
65      '' u ($2 < limit ? (5): 1/0):9 ls 4 axes xly2 notitle, \
66      '' u ($2 < limit ? (6): 1/0):10 ls 4 axes xly2 notitle, \
67      '' u ($2 < limit ? (7): 1/0):11 ls 4 axes xly2 notitle
68
69
70 if(a==8) set xtics ("x" 1, "y" 2, "z" 3, "n0" 4,"n1" 5,"n2" 6,"n3" 7,"n4" 8) scale 0.0
71
72 if(a==8) plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):5 ls 1 axes xly1 notitle, \
73      '' u ($2 < limit ? (2): 1/0):6 ls 2 axes xly1 notitle, \
74      '' u ($2 < limit ? (3): 1/0):7 ls 3 axes xly1 notitle, \
75      '' u ($2 < limit ? (4): 1/0):8 ls 4 axes xly2 notitle, \
76      '' u ($2 < limit ? (5): 1/0):9 ls 4 axes xly2 notitle, \
77      '' u ($2 < limit ? (6): 1/0):10 ls 4 axes xly2 notitle, \
78      '' u ($2 < limit ? (7): 1/0):11 ls 4 axes xly2 notitle, \
79      '' u ($2 < limit ? (8): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle
80
81 if(a==9) set xtics ("x" 1, "y" 2, "z" 3, "n0" 4,"n1" 5,"n2" 6,"n3" 7,"n4" 8, "N5" 9) scale 0.0
82
83 if(a==9) plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):5 ls 1 axes xly1 notitle, \
84      '' u ($2 < limit ? (2): 1/0):6 ls 2 axes xly1 notitle, \
85      '' u ($2 < limit ? (3): 1/0):7 ls 3 axes xly1 notitle, \
86      '' u ($2 < limit ? (4): 1/0):8 ls 4 axes xly2 notitle, \
87      '' u ($2 < limit ? (5): 1/0):9 ls 4 axes xly2 notitle, \
88      '' u ($2 < limit ? (6): 1/0):10 ls 4 axes xly2 notitle, \
89      '' u ($2 < limit ? (7): 1/0):11 ls 4 axes xly2 notitle, \
90      '' u ($2 < limit ? (8): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle, \
91      '' u ($2 < limit ? (9): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle
92
93 if(a==10) set xtics ("x" 1, "y" 2, "z" 3, "n0" 4,"n1" 5,"n2" 6,"n3" 7,"n4" 8, "N5" 9, "N6" 10)
94      scale 0.0
95
96 if(a==10) plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):5 ls 1 axes xly1 notitle, \
97      '' u ($2 < limit ? (2): 1/0):6 ls 2 axes xly1 notitle, \
98      '' u ($2 < limit ? (3): 1/0):7 ls 3 axes xly1 notitle, \
99      '' u ($2 < limit ? (4): 1/0):8 ls 4 axes xly2 notitle, \
100     '' u ($2 < limit ? (5): 1/0):9 ls 4 axes xly2 notitle, \
101     '' u ($2 < limit ? (6): 1/0):10 ls 4 axes xly2 notitle, \
102     '' u ($2 < limit ? (7): 1/0):11 ls 4 axes xly2 notitle, \
103     '' u ($2 < limit ? (8): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle, \
104     '' u ($2 < limit ? (9): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle, \
105     '' u ($2 < limit ? (10): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle
106
107 if(a==11) set xtics ("x" 1, "y" 2, "z" 3, "n0" 4,"n1" 5,"n2" 6,"n3" 7,"n4" 8, "N5" 9, "N6" 10,
108     "N7" 11) scale 0.0
109
110 if(a==11) plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):5 ls 1 axes xly1 notitle, \
111     '' u ($2 < limit ? (2): 1/0):6 ls 2 axes xly1 notitle, \
112     '' u ($2 < limit ? (3): 1/0):7 ls 3 axes xly1 notitle, \
113     '' u ($2 < limit ? (4): 1/0):8 ls 4 axes xly2 notitle, \
114     '' u ($2 < limit ? (5): 1/0):9 ls 4 axes xly2 notitle, \
115     '' u ($2 < limit ? (6): 1/0):10 ls 4 axes xly2 notitle, \
116     '' u ($2 < limit ? (7): 1/0):11 ls 4 axes xly2 notitle, \
117     '' u ($2 < limit ? (8): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle, \
118     '' u ($2 < limit ? (9): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle, \
119     '' u ($2 < limit ? (10): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle, \
120     '' u ($2 < limit ? (11): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle
121
122 unset label
123 unset y2label
124 unset y2range
125 unset y2tics
126
127 #-----
128 #setup the 2. plot
129
130 set boxwidth 0.05 relative
131
132 set autoscale
133 set xlabel ""
134 set logscale y
135 set ylabel "Evaluations"
136 set size .25, .4
137 set origin .0,.0
138 unset xtics
139 #set xrange [-.2:.4]
140 set ytics format "%.1e"
141
142 plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):2 ls 4 notitle
143
144 #-----
145 #setup the 3. plot
146
147 set logscale y
148 set ytics
149
150 set xlabel ""
151 set ylabel "Function Value"

```

```
148 set size .25, .4
149 set origin .25,.0
150 unset xtics
151 set ytics format "%.1e"
152
153 plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):3 ls 4 notitle
154
155 #-----
156 #setup the 4. plot
157 set xlabel ""
158 set ylabel "Sigma"
159 set ytics format "%.1e"
160
161 set size .25, .4
162 set origin .50,.0
163
164 unset logscale
165 set autoscale
166 unset xtics
167 set ytics
168
169 plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):lastDataCol ls 4 notitle
170
171 #-----
172 #setup the 5. plot
173 set xlabel ""
174 set ylabel "Distance"
175 set ytics format "%.1e"
176
177 set size .25, .4
178 set origin .75,.0
179
180 set autoscale
181 unset xtics
182 set ytics
183
184 plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):vectorCol ls 4 notitle
185
186 #-----
187 i=i+1
188
189 unset multiplot
190 unset xtics
191
192 if (i < m) reread
193 i=0
```


A.2. Lineplot

Listing A.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
3    , col, file) )
4
5  set style line 1 linetype 1 linecolor rgbcolor "#882f4f4f" linewidth .5
6  set style line 2 linetype 1 linecolor rgbcolor "#88696969" linewidth .5
7  set style line 3 linetype 1 linecolor rgbcolor "#88708090" linewidth .5
8  set style line 4 linetype 1 linecolor rgbcolor "#ccbebebe" linewidth .5
9
10 set style line 5 linetype 1 linecolor rgbcolor "#99696969" linewidth .3
11
12 if( i == 0 ) set terminal pngcairo truecolor transparent background "#ffffff" enhanced font "
13   arial,10" size w, h
14
15 set key right bottom vertical Left noreverse enhanced box samplen .2
16 set key opaque
17 set grid
18
19 lastDataCol = 3+a+2
20 inputfile = "data/" . i . ".dat"
21 outMultiplot = "img/linien/kondensiert/" . i . ".png"
22
23 file=inputfile ; row=2 ; col=2
24
25 set output outMultiplot
26 set multiplot layout 1,3
27 unset logscale
28 set autoscale
29
30 #
31 stats inputfile u 1 name "Stat" nooutput
32
33 #print "test " . at(file, Stat_records, 1)
34
35 locallimit=0.001*limit
36 print "local limit is: ", locallimit
37
38 #setup the first plot
39 set xrange [0:locallimit]
40
41 set ytics format "%.0f"
42 set yrange [-10:10]
43
44 if(a>3) set autoscale
45
46 set clip one
47 set xlabel "Funtion Evaluations"
48 set ylabel "Objective Values"
49 set xtics
50 set ytics
51 set size 1., .6
52 set origin .0,.4
53
54 #print "local locallimit ", locallimit
55
56 if( a==3 ) plot inputfile u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):4 w lines 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 title "x" ls 1, \
61   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):5 w lines title "y" ls 2, \
62   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):6 w lines title "z" ls 3, \
63   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):7 w lines title "n0" ls 4, \
64   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):8 w lines title "n1" ls 4, \
65   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):9 w lines title "n2" ls 4, \
66   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):10 w lines title "n3" ls 4
67
68 if( a==8 ) plot inputfile u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):7 w lines title "n0" ls 4, \
69   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):8 w lines title "n1" ls 4, \
70   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):9 w lines title "n2" ls 4, \
71   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):10 w lines title "n3" ls 4, \
72   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):11 w lines title "n4" ls 4, \
73   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):4 w lines title "x" ls 1, \
74   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):5 w lines title "y" ls 2, \
75   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):6 w lines title "z" ls 3
76
77 if( a==9 ) plot inputfile u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):7 w lines title "n0" ls 4, \
78   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):8 w lines title "n1" ls 4, \
79   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):9 w lines title "n2" ls 4, \
80   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):10 w lines title "n3" ls 4, \
81   "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):11 w lines title "n4" ls 4, \
```

```
81      "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):12 w lines title "n5" ls 4, \
82      "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):4 w lines title "x" ls 1, \
83      "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):5 w lines title "y" ls 2, \
84      "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):6 w lines title "z" ls 3
85
86  if( a==10 ) plot inputfile u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):7 w lines title "n0" ls 4, \
87      "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):8 w lines title "n1" ls 4, \
88      "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):9 w lines title "n2" ls 4, \
89      "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):10 w lines title "n3" ls 4, \
90      "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):11 w lines title "n4" ls 4, \
91      "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):12 w lines title "n5" ls 4, \
92      "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):13 w lines title "n6" ls 4, \
93      "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):4 w lines title "x" ls 1, \
94      "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):5 w lines title "y" ls 2, \
95      "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):6 w lines title "z" ls 3
96
97  if( a==11 ) plot inputfile u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):7 w lines 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 "Fitness"
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
```

A.3. Scatterplot

Listing A.3: Gnuplot Scatterplot-Skript

```
1  # This scripts use is to generate a plot from the final values of the solutions for one antenna
2  #
3  # prerequisites set i, n and the number of antennas to proper values
4  #
5
6  at(file, row, col) = system( sprintf("awk -v row=%d -v col=%d 'NR == row {print $col}' %s", row
7  , col, file) )
8  to(file, min, first, mean, third, max, row) = system( sprintf("echo %d %e %e %e %e %e >> %s",
9  row, min, first, mean, third, max, file) )
10 header(file) = system( sprintf("#Idx min first mean third max\" >> %s", file) )
11 toScientific(file, min, first, mean, third, max, row) = system( sprintf("echo %d %e %e %e %e %e
12 >> %s", row, min, first, mean, third, max, file) )
13 remove(file) = system( sprintf("rm %s", file) )
14 to2(file, value) = system( sprintf("echo 1 2 3 %s %s", value, file) )
15 echoStats( min, first, mean, third, max) = system( sprintf("echo %e %e %e %e %e %e ", min, first,
16 mean, third, max) )
17
18 unset style
19 set style line 1 linetype 1 linecolor rgb "#708090" linewidth 1 pointtype 7 pointsize .5
20 set style line 2 linetype -1 linecolor rgb "#2f4f4f" linewidth 1.2
21
22 set style line 3 linetype 1 linecolor rgb "#ee708090" linewidth 1.000 pointtype 7 pointsize .5
23 pointinterval 1
24 #set style line 3 linetype 1 linecolor rgb "red" linewidth 1.000 pointtype 7 pointsize 1
25 pointinterval 5
26 #set style line 4 linetype 1 linecolor rgb "gray" linewidth 1 pointtype 2 pointsize default
27 pointinterval 0
28
29 set style arrow 1 heads size screen 0.008,90 ls 2
30
31 if( i == 0 ) set terminal pngcairo truecolor transparent background "#ffffff" enhanced font "
32 arial,10" size w, h
33
34 set style fill transparent solid 0.3 noborder
35 set key right bottom vertical Left noreverse enhanced box samples .2
36 set key opaque
37 set grid
38
39 lastDataCol = 3+a+2
40 inputfile = "data/single_".i.".dat"
41 input_all = "data/single_".i.".dat"
42 input_one = "data/".i.".dat"
43
44 outMultiplot = "img/linien/kondensiert/scatter".i.".png"
45
46 #print "Processing: Start"
47
48 set output outMultiplot
49
50 set multiplot layout a,a
51
52 #collect information about the file
53 unset logscale
54 set autoscale
55 unset label
56 unset xlabel
57 unset ylabel
58
59 #-----
60 #setup the 1. plot
61 unset ytics
62 unset xtics
63
64 LABELX = sprintf("x" )
65 LABELY = sprintf("y" )
66 LABELZ = sprintf("z" )
67 LABELN0 = sprintf("n0" )
68 LABELN1 = sprintf("n1" )
69 LABELN2 = sprintf("n2" )
70 LABELN3 = sprintf("n3" )
71 LABELN4 = sprintf("n4" )
72 LABELN5 = sprintf("n5" )
73 LABELN6 = sprintf("n6" )
74 LABELN7 = sprintf("n7" )
75
76 unset key
77
78 labelxpos = .1
79 labelypos = .5
80
81 # generate first row
```

```
74 set label at graph labelxpos, labelypos center LABELX front left font "Arial,24" textcolor rgb "#4f2f2f"
75 plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):5 ls 3 notitle
76 unset label
77
78 plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):6 ls 1 notitle
79 plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):7 ls 1 notitle
80 if(a>=4)plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):8 ls 1 notitle
81 if(a>=5)plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):9 ls 1 notitle
82 if(a>=6)plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):10 ls 1 notitle
83 if(a>=7)plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):11 ls 1 notitle
84 if(a>=8)plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):12 ls 1 notitle
85 if(a>=9)plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):13 ls 1 notitle
86 if(a>=10)plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):14 ls 1 notitle
87 if(a>=11)plot inputfile u ($2 < limit ? $5: 1/0):15 ls 1 notitle
88
89 # 2.
90 plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):5 ls 1 notitle
91
92 set label at graph labelxpos, labelypos center LABELY front left font "Arial,24" textcolor rgb "#4f2f2f"
93 plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):6 ls 3 notitle
94 unset label
95
96 plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):7 ls 1 notitle
97 if(a>=4)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):8 ls 1 notitle
98 if(a>=5)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):9 ls 1 notitle
99 if(a>=6)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):10 ls 1 notitle
100 if(a>=7)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):11 ls 1 notitle
101 if(a>=8)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):12 ls 1 notitle
102 if(a>=9)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):13 ls 1 notitle
103 if(a>=10)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):14 ls 1 notitle
104 if(a>=11)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):15 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 "Arial,24" textcolor rgb "#4f2f2f"
111 plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):7 ls 3 notitle
112 unset label
113
114 if(a>=4)plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):8 ls 1 notitle
115 if(a>=5)plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):9 ls 1 notitle
116 if(a>=6)plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):10 ls 1 notitle
117 if(a>=7)plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):11 ls 1 notitle
118 if(a>=8)plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):12 ls 1 notitle
119 if(a>=9)plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):13 ls 1 notitle
120 if(a>=10)plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):14 ls 1 notitle
121 if(a>=11)plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):15 ls 1 notitle
122
123 # 4.
124 if(a>=3)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):5 ls 1 notitle
125 if(a>=3)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):6 ls 1 notitle
126 if(a>=3)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):7 ls 1 notitle
127
128 set label at graph labelxpos, labelypos center LABELN0 front left font "Arial,24" textcolor rgb "#4f2f2f"
129 if(a>=4)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):8 ls 3 notitle
130 unset label
131
132 if(a>=5)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):9 ls 1 notitle
133 if(a>=6)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):10 ls 1 notitle
134 if(a>=7)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):11 ls 1 notitle
135 if(a>=8)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):12 ls 1 notitle
136 if(a>=9)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):13 ls 1 notitle
137 if(a>=10)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):14 ls 1 notitle
138 if(a>=11)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):15 ls 1 notitle
139
140 # 5.
141 if(a>=3)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):5 ls 1 notitle
142 if(a>=3)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):6 ls 1 notitle
143 if(a>=3)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):7 ls 1 notitle
144 if(a>=4)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):8 ls 1 notitle
145
146 set label at graph labelxpos, labelypos center LABELN1 front left font "Arial,24" textcolor rgb "#4f2f2f"
147 if(a>=5)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):9 ls 3 notitle
148 unset label
149
150 if(a>=6)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):10 ls 1 notitle
151 if(a>=7)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):11 ls 1 notitle
152 if(a>=8)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):12 ls 1 notitle
153 if(a>=9)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):13 ls 1 notitle
154 if(a>=10)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):14 ls 1 notitle
155 if(a>=11)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):15 ls 1 notitle
156
```

```
157 # 6.
158 if(a>3)plot inputfile u ($2 < limit ? $10: 1/0):5 ls 1 notitle
159 if(a>3)plot inputfile u ($2 < limit ? $10: 1/0):6 ls 1 notitle
160 if(a>3)plot inputfile u ($2 < limit ? $10: 1/0):7 ls 1 notitle
161 if(a>=4)plot inputfile u ($2 < limit ? $10: 1/0):8 ls 1 notitle
162 if(a>=5)plot inputfile u ($2 < limit ? $10: 1/0):9 ls 1 notitle
163
164 set label at graph labelxpos,labelypos center LABELN2 front left font "Arial,24" textcolor rgb
    "#4f2f2f"
165 if(a>=6)plot inputfile u ($2 < limit ? $10: 1/0):10 ls 3 notitle
166 unset label
167
168 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 labelxpos,labelypos center LABELN6 front left font "Arial,24"
    textcolor rgb "#4f2f2f"
236 if(a>=10) plot inputfile u ($2 < limit ? $14: 1/0):14 ls 1 notitle
237 if(a>=10) unset label
238
239 if(a>=11) plot inputfile u ($2 < limit ? $14: 1/0):15 ls 1 notitle
```

```
240
241 # Generate last row
242 if(a>=11) plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):5 ls 1 notitle
243 if(a>=11) plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):6 ls 1 notitle
244 if(a>=11) plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):7 ls 1 notitle
245 if(a>=11) plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):8 ls 1 notitle
246 if(a>=11) plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):9 ls 1 notitle
247 if(a>=11) plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):10 ls 1 notitle
248 if(a>=11) plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):11 ls 1 notitle
249 if(a>=11) plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):12 ls 1 notitle
250 if(a>=11) plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):13 ls 3 notitle
251 if(a>=10) plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):14 ls 1 notitle
252
253 if(a>=11) set label at graph labelxpos,labelypos center LABELN7 front left font "Arial,24"
254             textcolor rgb "#4f2f2f"
255 if(a>=11) plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):15 ls 1 notitle
256 if(a>=11) unset label
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 )
```

Entwurf

Literaturverzeichnis

- [1] BORGWERTH, Bernd ; GNIP, Christoph: Abschätzung der Wellenzahl durch Korrelation mit Kalibrierpunkten. (2012)
- [2] BRONŠTEJN, I.N. ; SEMENDJAJEW, K.A. ; MUSIOL, G. ; MÜHLIG, H.: *Taschenbuch der Mathematik. Mit CD-ROM.* Deutsch Harri GmbH, 2012 <http://books.google.de/books?id=uPKPMAEACAAJ>. – ISBN 9783817120185
- [3] 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
- [4] GITHUB.COM: *GitHub — Repository Host.* <https://github.com>, 2013. – [Online, zuletzt geprüft am 30.4.2013]
- [5] 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]
- [6] 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]
- [7] In: HANSEN, Nikolaus: *The CMA Evolution Strategy.* 2011
- [8] 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]
- [9] HERMANN, M.: *Numerische Mathematik.* Oldenbourg Wissensch.Vlg, 2001 <http://books.google.de/books?id=6BvvAAAAAAAJ>. – ISBN 9783486255584
- [10] HERMANN, M.: *Numerische Mathematik.* Oldenbourg Wissensch.Vlg, 2001 <http://books.google.de/books?id=145jSrRdL7AC>. – ISBN 9783486579352
- [11] [HTTP://WWW.FOEBUD.ORG/RFIDM](http://www.foebud.org/rfidm): *Digitalcourage.* <http://www.foebud.org/rfid>, 2013. – [Online, zuletzt geprüft am 22.8.2013]

- [12] 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
- [13] KOST, B.: *Optimierung mit Evolutionsstrategien*. Deutsch Harri GmbH, 2003 <http://books.google.de/books?id=FcgNjiG4lcAC>. – ISBN 9783817116993
- [14] MUZALEWSKI, Mathäus: *Einsatz von Lernverfahren zur Interpolation von Positionsdaten eines RFID-basierten Navigationssystems*. 2011
- [15] OTTO GMBH & CO KG (Hrsg.): *Grundsätze*. http://www.otto.com/umwelt/umwelt_grundindex.html, Abruf: 5. Okt. 2004. – Einstiegsseite zum Unternehmensleitbild
- [16] 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
- [17] RFIDJOURNAL.COM: *RFID-Journal*. <http://www.rfidjournal.com>, 2013. – [Online, zuletzt geprüft am 22.8.2013]
- [18] SIMO SÄRKKÄ ; JAAKKOLA, Kaarle ; HUUSKO, Ville V. Viikari M.: Phase-Based UHF RFID Tracking With Nonlinear Kalman Filtering and Smoothing. (2012), February
- [19] WIKIPEDIA: *Kalman-Filter* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Kalman-Filter&oldid=116893284>. <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Kalman-Filter&oldid=116893284>. Version: 2013. – [Online; zuletzt editiert am 4-April-2013]
- [20] WILLE, Winter S. Andreas: Medical Navigation Based on RFID Tag Signals: Model and Simulation. 55 (2010). <http://dx.doi.org/10.1515>. – DOI 10.1515
- [21] WINTER, Susanne: Ansätze zur Kalibrierung der Wellenzahl im RFID-Trackingsystem der Firma amedo.
- [22] 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