

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
Universitätstraße 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	1
1.2.1. Kondition	2
1.2.2. SVD	2
1.2.3. Evolutionäre Strategien	3
1.2.4. Evolutionsstrategien - Grundlagen	3
1.2.5. Strategien mit mehreren Populationen	5
1.2.6. Phase und Wellenzahl	5
1.3. technisches	7
1.3.1. RFID	7
1.4. Anforderungen an das Verfahren	9
1.5. Ziel	9
2. Hauptteil	11
2.1. Vorüberlegung zur Komplexität	11
2.2. Entwicklung des Modells	11
2.3. Erweiterte Betrachtung der Kondition	17
2.3.1. Weitere Anwendung der Konditionszahl	18
2.4. Realisierung der Kalibrierung	18
2.4.1. Implementation	19
2.4.2. Ergebnis	19
2.5. Betrachtung der Komplexität	20
2.6. Software	20
2.7. Hardware	21
3. Ergebnisse und Erkenntnisse	27
4. Diskussion	29
5. Schluss	31
5.1. Offene Punkte	31
5.2. Diskussion der Ergebnisse	31
5.3. Verbesserungen	32
5.4. Ausblick	32
A. Gnuplot Skripte	33
A.1. Boxplot	33
A.2. Lineplot	36

A.3. Scatterplot	38
----------------------------	----

Entwurf

Abbildungsverzeichnis

1.1. Ablauf Evolutionsstrategie	6
1.2. Zusammenhang Wellenlänge - Wellenzahl	7
1.3. Beispiele für Transponder und Lesegeräte	8
2.1. Antennen-Szene mit einem Tag	12
2.2. Analyse der Konditionszahlen aller möglichen Matrizen für den Messaufbau; Die Konditionszahl ist für jede mögliche Permutation an Messantennen für eine Referenzantenne angegeben	22
2.4. Ablauf der Kalibrierung	23
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 Größe enthält der obere und untere Quartil der Daten, der Strich in der Box zeigt den Mittelwert aller Lösungen.	24
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).	25
2.7. Das visualisierte Endergebnis der Kalibrierung.	26
2.8. Werkzeuge die bei der Kalibrierung verwendet werden.	26

--

--

--

Tabellenverzeichnis

2.1. Finale Antennen Koordinaten 19

Entwurf

--

Entwurf

Listings

../dev/src/c-cpp/AntConfApp/build/Debug/test/output/mkII/plot/kondensierte_boxen.gp 33
../dev/src/c-cpp/AntConfApp/build/Debug/test/output/mkII/plot/kondensierte_linien.gp 36
../dev/src/c-cpp/AntConfApp/build/Debug/test/output/mkII/plot/scatter.gp 38

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

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.

--

--

--

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 großen 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. 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.

¹siehe 2.1 und 2.5

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:

"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."

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

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, Kaptiel 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 Evolutionstrategie 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.

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

Selektion

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

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.

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. 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 (??)).
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 Reflexionen 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.

1.4. Anforderungen an das Verfahren

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

⁴insert reference here

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

1.5. Ziel

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Systems zur Ermittlung der Wellenzahl. Das System wird im Kern die Lösung über numerische Verfahren finden, im speziellen das sog CMA-ES. Dazu muss ein Modell gefunden werden, dass sich für dieses Verfahren eignet. Darüber hinaus soll das Modell 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.

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

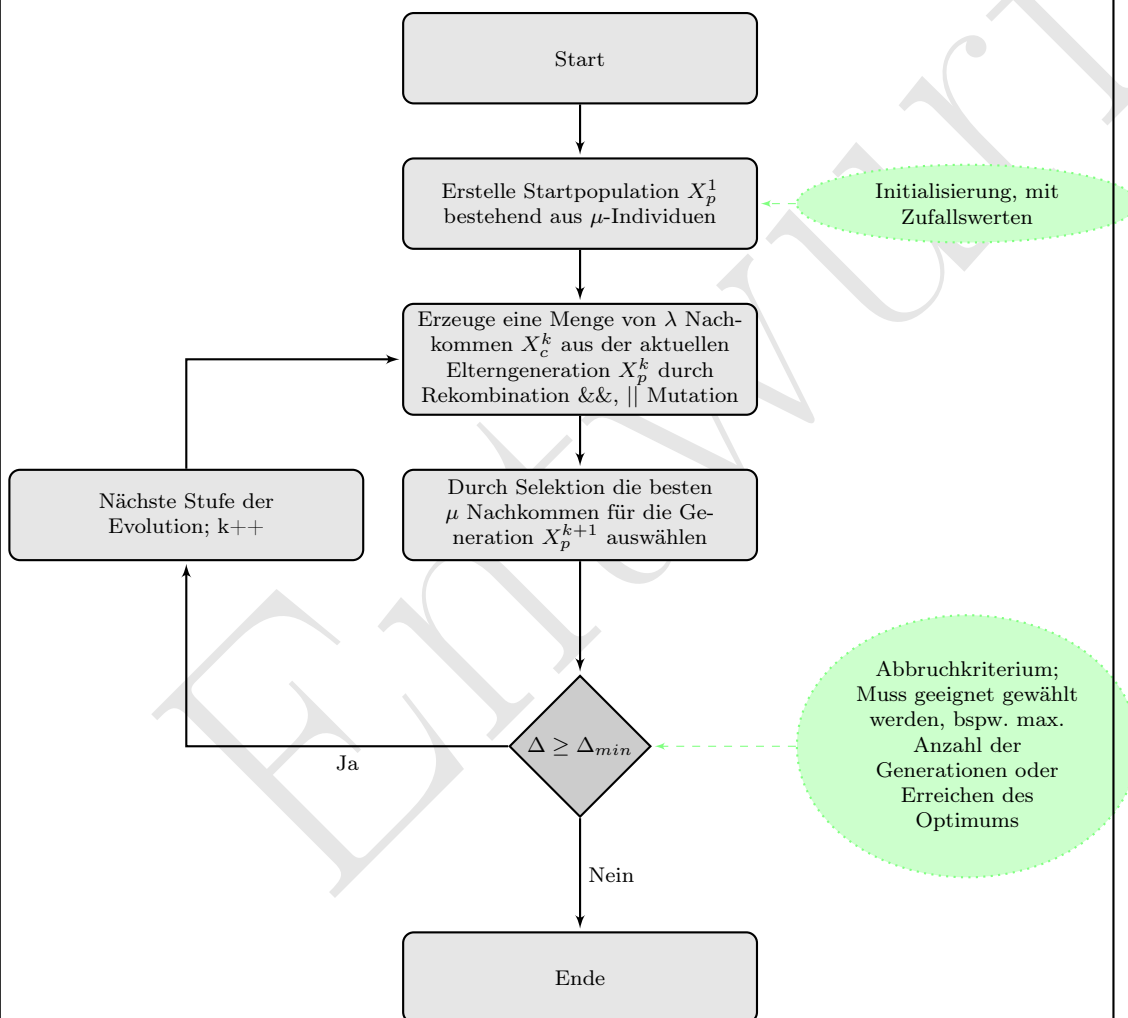


Abbildung 1.2.: Dargestellt ist der Zusammenhang zwischen der Wellenlänge λ und der Wellenzahl n . Da die Phase alle 2π den gleichen Wert annimmt, wird mit dem Faktor n ein vielfaches der Wellenlänge aufaddiert. Dadurch erhält man die Entfernung zu dem Tag.

Platzhalter

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. 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.

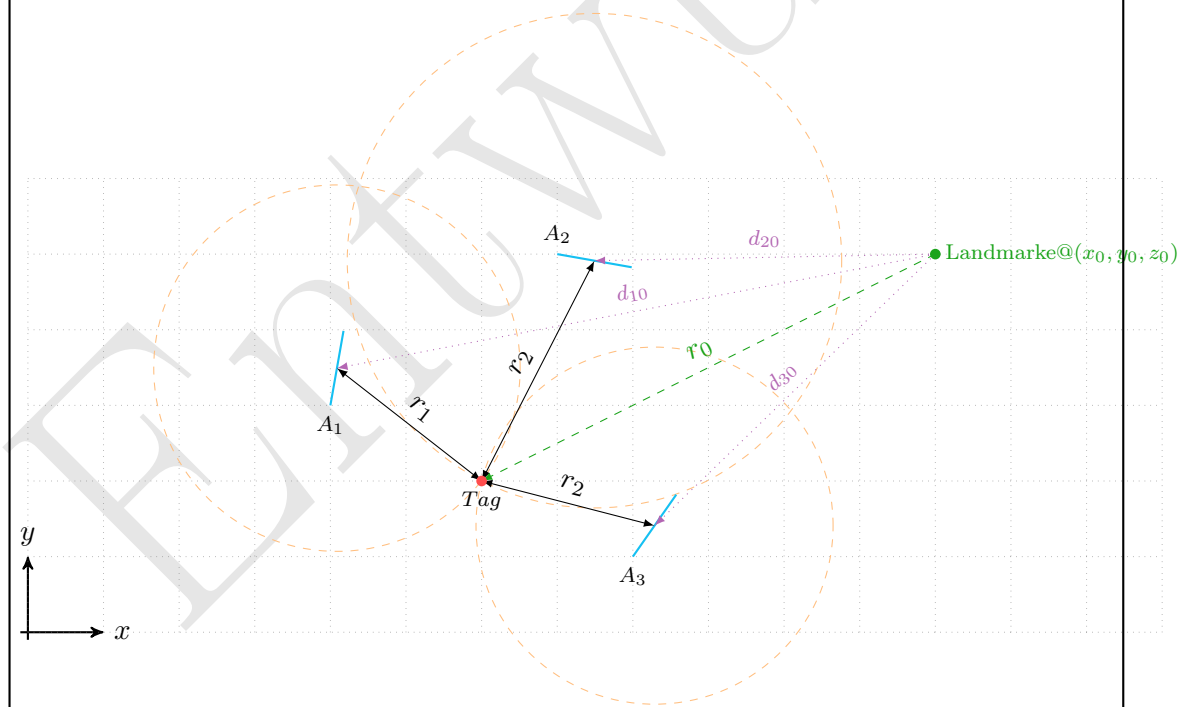
Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit 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_{kJ} := Abstand zur Landmarke
- N_0 := Menge der verfügbaren Antennen $N = \{1, \dots, 8\}$
- N := Menge der Antennen die für die Optimierung verwendet werden können ($N \subseteq N_0$)

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.



- $N' :=$ 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:

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

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:

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

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

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: $\mathbf{0} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}$ 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:

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

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:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 & -a_1 & 0 & 0 & -a_2 \Theta_0 & a_2 \Theta_3 & 0 & 0 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 & 0 & -a_1 & 0 & -a_2 \Theta_0 & 0 & a_2 \Theta_3 & 0 \\ x_3 - x_0 & y_3 - y_0 & z_3 - z_0 & 0 & 0 & -a_1 & -a_2 \Theta_0 & 0 & 0 & a_2 \Theta_3 \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \\ n_0^2 - n_1^2 \\ (\dots) \\ n_0^2 - n_3^2 \\ n_0 \\ n_1 \\ (\dots) \\ n_3 \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

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 hinzu, 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. 2.23) und können im Voraus berechnet werden. Es sind nun auch die gemessenen Phasenwerte Teil des Modells, genauer: der Matrix **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.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{Z} & \mathbf{P} & \mathbf{V} \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

Dabei ist:

$$\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \quad \mathbf{P} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \quad \mathbf{V} \in \mathbb{R}^{4 \times 3} \quad (2.24)$$

Die Matrizen **Z** und **P** sind statisch. Hingegen enthält die Matrix **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

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 wie folgt:

SVD

Das unter 1.2.2 vorgestellte Verfahren der Singular-Value-Decomposition kann dazu verwendet werden eine Lösung eines Gleichungssystems zu berechnen. Das Modell, dass 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 Visualisierung 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.

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

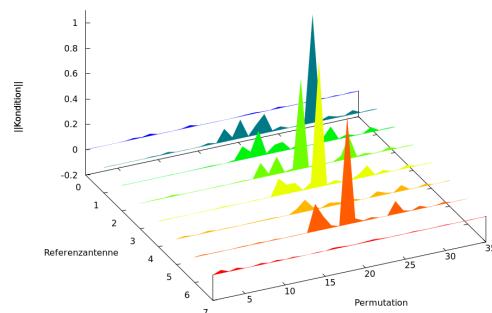
Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus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

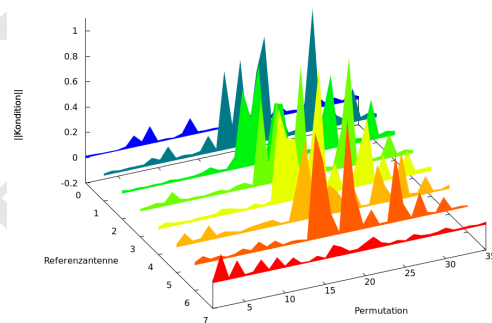
mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

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

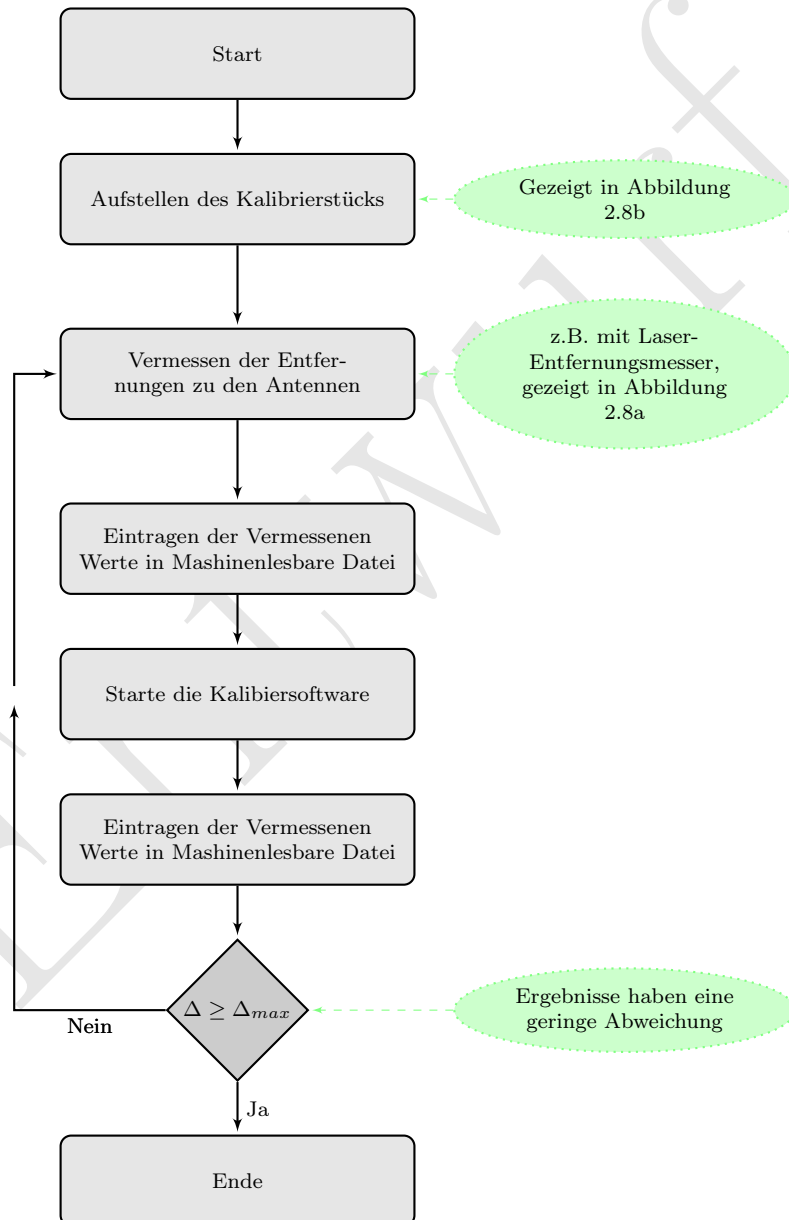


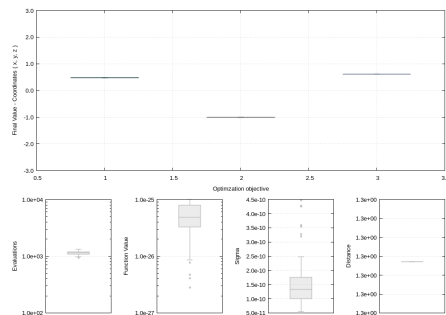
(a) Konditionszahl der rein geometrischen 3×3 Matrix normiert auf den größten vorkommenden Wert (= 2149,16)



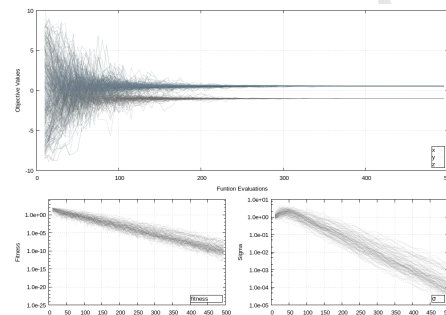
(b) Konditionszahl der 10×3 Matrix normiert auf den größten vorkommenden Wert (= 257,13); In dieser Konfiguration sind die Konstanten (a_1 & a_2) sowie die variablen, gemessenen Phasen Θ_k enthalten

Abbildung 2.4.: Ablauf der Kalibrierung

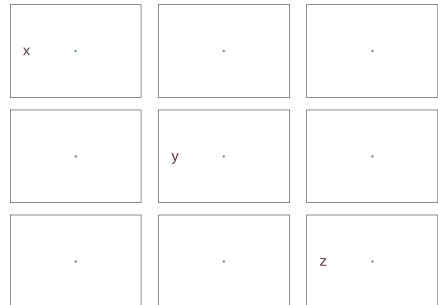




(a) lorem

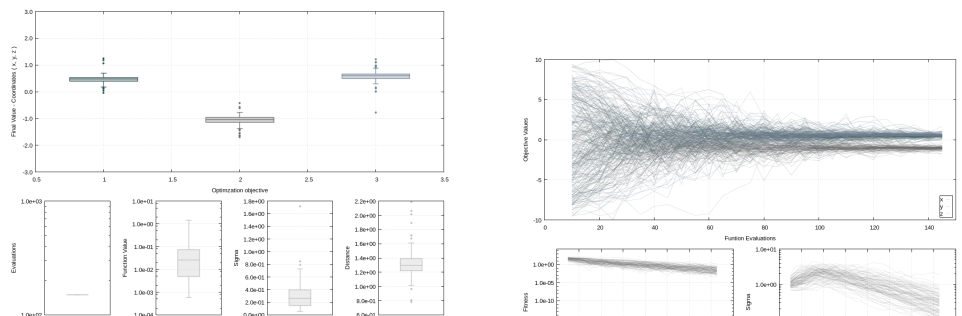


(b) lorem



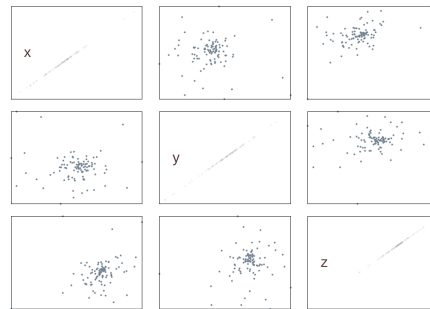
(c) lorem

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).

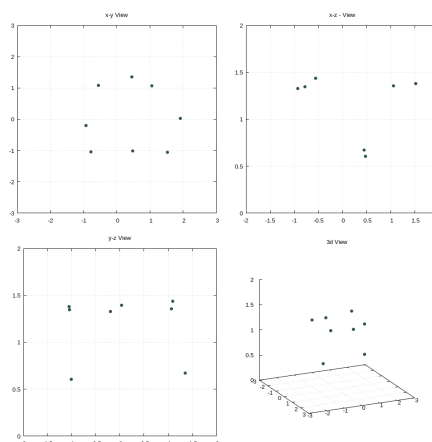
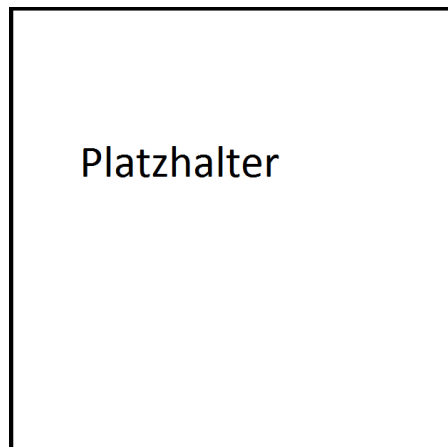
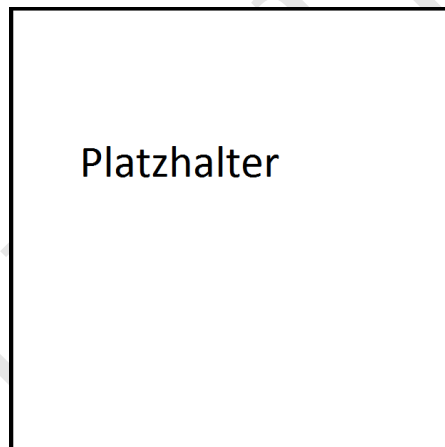


Abbildung 2.7.: Das visualisierte Endergebnis der Kalibrierung.



(a) Laser Entfernungsmesser der Fa. Bosch



(b) Kalibrierstück, verwendet zum Einmessen des Antennenaufbaus

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

--

--

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.

--

--

--

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.

--

--

--

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.

5.1. Offene Punkte

5.2. Diskussion der Ergebnisse

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.

5.3. Verbesserungen

5.4. Ausblick

A. Gnuplot Skripte

A.1. Boxplot

```
1 set style line 1 linetype 1 linecolor rgbcolor "#2f4f4f" linewidth 1.5 pointtype 7
2   pointsize .5 pointinterval 1
3 set style line 2 linetype 1 linecolor rgbcolor "#696969" linewidth 1.5 pointtype 7
4   pointsize .5 pointinterval 1
5 set style line 3 linetype 1 linecolor rgbcolor "#708090" linewidth 1.5 pointtype 7
6   pointsize .5 pointinterval 1
7 set style line 4 linetype 1 linecolor rgbcolor "#bebebe" linewidth 1.5 pointtype 7
8   pointsize .5 pointinterval 1
9
10 if( i == 0 ) set terminal pngcairo truecolor transparent background "#ffffff" enhanced
11   font "arial,10" size w, h
12
13 set style fill transparent solid 0.3 noborder
14 #set style boxplot outliers pointtype 19
15 #set style data boxplot
16 #set key right bottom vertical Left noreverse enhanced box sample .2
17 #set key opaque
18 set grid
19
20 #in this column we find the Data for sigma
21 lastDataCol = 3+a+2
22 #int this column we expect the vector
23 vectorCol = 3+a+3
24 inputfile = "data/single_".i.".dat"
25 outMultiplot = "img/boxen/kondensiert/".i.".png"
26
27 set output outMultiplot
28 set multiplot layout 1,3
29 unset logscale
30 set autoscale
31 unset label
32
33 #-----
34 #setup the 1. plot
35 set style data boxplot
36 set xlabel "Optimization_objective"
37 set ylabel "Final_Value_-_Coordinates_(x,y,z)"
38
39 set size 1, .6
40 set origin .0,.4
41 set autoscale
42 set xrange [.5:a+.5]
43 set xtics
44
45 set ytics format "%.1f"
46 set yrange [-3:3]
47 if(a>3) set y2tics format "%.1f"
48 if(a>3) set y2label "Final_Value_-_Wavenumbers_(n)"
49
50 print "a=",a
51 if(a==3) plot inputfile u (1):5 ls 1 axes xly1 notitle, \
52   '' u (2):6 ls 2 axes xly1 notitle, \
53   '' u (3):7 ls 3 axes xly1 notitle
54 if(a==3) unset y2tics
55 if(a==3) unset y2label
56
57 if(a==6) plot inputfile u (1):5 ls 1 notitle, \
58   '' u (2):6 ls 2 notitle, \
59   '' u (3):7 ls 3 notitle, \
60   '' u (4):8 ls 4 notitle, \
61   '' u (5):9 ls 4 notitle, \
62   '' u (6):10 ls 4 notitle
63
64 if(a==7) set xtics ("x" 1, "y" 2, "z" 3, "n0" 4,"n1" 5,"n2" 6,"n3" 7) scale 0.0
65
66 if(a==7) plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):5 ls 1 axes xly1 notitle, \
67   '' u ($2 < limit ? (2): 1/0):6 ls 2 axes xly1 notitle, \
68   '' u ($2 < limit ? (3): 1/0):7 ls 3 axes xly1 notitle, \
69   '' u ($2 < limit ? (4): 1/0):8 ls 4 axes xly2 notitle, \
70   '' u ($2 < limit ? (5): 1/0):9 ls 4 axes xly2 notitle, \
71   '' 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)
82      scale 0.0
83
84  if(a==9) plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):5 ls 1 axes xly1 notitle, \
85      '' u ($2 < limit ? (2): 1/0):6 ls 2 axes xly1 notitle, \
86      '' u ($2 < limit ? (3): 1/0):7 ls 3 axes xly1 notitle, \
87      '' u ($2 < limit ? (4): 1/0):8 ls 4 axes xly2 notitle, \
88      '' u ($2 < limit ? (5): 1/0):9 ls 4 axes xly2 notitle, \
89      '' u ($2 < limit ? (6): 1/0):10 ls 4 axes xly2 notitle, \
90      '' u ($2 < limit ? (7): 1/0):11 ls 4 axes xly2 notitle, \
91      '' u ($2 < limit ? (8): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle, \
92      '' u ($2 < limit ? (9): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle
93
94  if(a==10) set xtics ("x" 1, "y" 2, "z" 3, "n0" 4,"n1" 5,"n2" 6,"n3" 7,"n4" 8, "N5" 9, "
95      N6" 10) scale 0.0
96
97  if(a==10) plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):5 ls 1 axes xly1 notitle, \
98      '' u ($2 < limit ? (2): 1/0):6 ls 2 axes xly1 notitle, \
99      '' u ($2 < limit ? (3): 1/0):7 ls 3 axes xly1 notitle, \
100     '' u ($2 < limit ? (4): 1/0):8 ls 4 axes xly2 notitle, \
101     '' u ($2 < limit ? (5): 1/0):9 ls 4 axes xly2 notitle, \
102     '' u ($2 < limit ? (6): 1/0):10 ls 4 axes xly2 notitle, \
103     '' u ($2 < limit ? (7): 1/0):11 ls 4 axes xly2 notitle, \
104     '' u ($2 < limit ? (8): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle, \
105     '' u ($2 < limit ? (9): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle, \
106     '' u ($2 < limit ? (10): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle
107
108  if(a==11) set xtics ("x" 1, "y" 2, "z" 3, "n0" 4,"n1" 5,"n2" 6,"n3" 7,"n4" 8, "N5" 9, "
109      N6" 10, "N7" 11) scale 0.0
110
111  if(a==11) plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):5 ls 1 axes xly1 notitle, \
112      '' u ($2 < limit ? (2): 1/0):6 ls 2 axes xly1 notitle, \
113      '' u ($2 < limit ? (3): 1/0):7 ls 3 axes xly1 notitle, \
114      '' u ($2 < limit ? (4): 1/0):8 ls 4 axes xly2 notitle, \
115      '' u ($2 < limit ? (5): 1/0):9 ls 4 axes xly2 notitle, \
116      '' u ($2 < limit ? (6): 1/0):10 ls 4 axes xly2 notitle, \
117      '' u ($2 < limit ? (7): 1/0):11 ls 4 axes xly2 notitle, \
118      '' u ($2 < limit ? (8): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle, \
119      '' u ($2 < limit ? (9): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle, \
120      '' u ($2 < limit ? (10): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle, \
121      '' u ($2 < limit ? (11): 1/0):12 ls 4 axes xly2 notitle
122
123  unset label
124  unset y2label
125  unset y2range
126  unset y2tics
127
128  #-----
129  #setup the 2. plot
130
131  set boxwidth 0.05 relative
132
133  set autoscale
134  set xlabel ""
135  set logscale y
136  set ylabel "Evaluations"
137  set size .25, .4
138  set origin .0,.0
139  unset xtics
140  #set xrange [-.2:.4]
141  set ytics format "%.1e"
142
143  plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):2 ls 4 notitle
144
145  #-----
146  #setup the 3. plot
147
148  set logscale y
149  set ytics
150
151  set xlabel ""
152  set ylabel "Function_Value"
153  set size .25, .4
154  set origin .25,.0
155  unset xtics
156  set ytics format "%.1e"

```

```
152 plot inputfile u ($2 < limit ? (1): 1/0):3 ls 4 notitle
153
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

```
1 #prerequisites set i, n and the number of antennas to proper values
2 at(file, row, col) = system( sprintf("awk-v_row=%d-v_col=%d-NR==_row_{print_$col}"',_%
   s", row, col, file) )
3
4 set style line 1 linetype 1 linecolor rgbcolor "#882f4f4f" linewidth .5
5 set style line 2 linetype 1 linecolor rgbcolor "#88696969" linewidth .5
6 set style line 3 linetype 1 linecolor rgbcolor "#88708090" linewidth .5
7 set style line 4 linetype 1 linecolor rgbcolor "#ccbcbcbcb" linewidth .5
8
9 set style line 5 linetype 1 linecolor rgbcolor "#99696969" linewidth .3
10
11 if( i == 0 ) set terminal pngcairo truecolor transparent background "#ffffff" enhanced
   font "arial,10" size w, h
12
13 set key right bottom vertical Left noreverse enhanced box sample .2
14 set key opaque
15 set grid
16
17 lastDataCol = 3+a+2
18 inputfile = "data/.i.".dat"
19 outMultiplot = "img/linien/kondensiert/.i.".png"
20
21 file=inputfile ; row=2 ; col=2
22
23 set output outMultiplot
24 set multiplot layout 1,3
25 unset logscale
26 set autoscale
27
28 -----
29 stats inputfile u 1 name "Stat" nooutput
30
31 #print "test ".at(file,Stat_records,1)
32
33 locallimit=0.001*limit
34 print "local_limit is:",locallimit
35
36 #setup the first plot
37 set xrange [0:locallimit]
38
39 set ytics format "%.0f"
40 set yrange [-10:10]
41
42 if(a>3) set autoscale
43
44 set clip one
45 set xlabel "Funtion_Evaluations"
46 set ylabel "Objective_Values"
47 set xtics
48 set ytics
49 set size 1., .6
50 set origin .0,.4
51
52 #print "local locallimit ",locallimit
53
54
55 if( a==3 ) plot inputfile u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):4 w lines title "x" ls 1, \
56                "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):5 w lines title "y" ls 2, \
57                "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):6 w lines title "z" ls 3
58
59 if( a==7 ) plot inputfile u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):4 w lines title "x" ls 1, \
60                "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):5 w lines title "y" ls 2, \
61                "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):6 w lines title "z" ls 3, \
62                "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):7 w lines title "n0" ls 4, \
63                "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):8 w lines title "n1" ls 4, \
64                "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):9 w lines title "n2" ls 4, \
65                "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):10 w lines title "n3" ls 4
66
67 if( a==8 ) plot inputfile u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):7 w lines title "n0" ls 4, \
68                "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):8 w lines title "n1" ls 4, \
69                "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):9 w lines title "n2" ls 4, \
70                "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):10 w lines title "n3" ls 4, \
71                "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):11 w lines title "n4" ls 4, \
72                "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):4 w lines title "x" ls 1, \
73                "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):5 w lines title "y" ls 2, \
74                "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):6 w lines title "z" ls 3
75
76 if( a==9 ) plot inputfile u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):7 w lines title "n0" ls 4, \
77                "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):8 w lines title "n1" ls 4, \
78                "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):9 w lines title "n2" ls 4, \
79                "" u ($1 < locallimit ? $1 : 1/0):10 w lines title "n3" ls 4, \
80                "" 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_
129     s}"
130
131 i=i+1
132 unset multiplot
133
134 if ( i < m) reread
135 i=0
```

A.3. Scatterplot

```
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, col, file) )
7 to(file, min, first, mean, third, max, row) = system( sprintf("echo_%d_%e_%e_%e_%e_>>
   %s", row, min, first, mean, third, max ,file) )
8 header(file) = system( sprintf("echo_\##Idx_min_first_mean_third_max\">>%s", file) )
9 toScientific(file, min, first, mean, third, max, row) = system( sprintf("echo_%d_%e_%e_%
   e_%e_%e_>>%s", row, min, first, mean, third, max ,file) )
10 remove(file) = system( sprintf( "rm_%s", file ) )
11 to2(file, value) = system( sprintf("echo_1_2_3_%s_%s", value, file) )
12 echoStats( min, first, mean, third, max) = system( sprintf("echo_%e_%e_%e_%e_%e_", min,
   first, mean, third, max) )
13
14 unset style
15 set style line 1 linetype 1 linecolor rgb "#708090" linewidth 1 pointtype 7 pointsize
   .5
16 set style line 2 linetype -1 linecolor rgb "#2f4f4f" linewidth 1.2
17
18 set style line 3 linetype 1 linecolor rgb "#ee708090" linewidth 1.000 pointtype 7
   pointsize .5 pointinterval 1
19 #set style line 3 linetype 1 linecolor rgb "red" linewidth 1.000 pointtype 7 pointsize
   1 pointinterval 5
20 #set style line 4 linetype 1 linecolor rgb "gray" linewidth 1 pointtype 2 pointsize
   default pointinterval 0
21
22 set style arrow 1 heads size screen 0.008,90 ls 2
23
24 if( i == 0 ) set terminal pngcairo truecolor transparent background "#ffffff" enhanced
   font "arial,10" size w, h
25
26 set style fill transparent solid 0.3 noborder
27 set key right bottom vertical Left noreverse enhanced box samplen .2
28 set key opaque
29 set grid
30
31 lastDataCol = 3+a+2
32 inputfile = "data/single_".i.".dat"
33 input_all = "data/single_".i.".dat"
34 input_one = "data/".i.".dat"
35
36 outMultiplot = "img/linien/kondensiert/scatter".i.".png"
37
38 #print "Processing: Start"
39
40 set output outMultiplot
41
42 set multiplot layout a,a
43
44 #collect information about the file
45 unset logscale
46 set autoscale
47 unset label
48 unset xlabel
49 unset ylabel
50
51 #-----
52 #setup the 1. plot
53 unset ytics
54 unset xtics
55
56 LABELX = sprintf("x" )
57 LABELY = sprintf("y" )
58 LABELZ = sprintf("z" )
59 LABELN0 = sprintf("n0" )
60 LABELN1 = sprintf("n1" )
61 LABELN2 = sprintf("n2" )
62 LABELN3 = sprintf("n3" )
63 LABELN4 = sprintf("n4" )
64 LABELN5 = sprintf("n5" )
65 LABELN6 = sprintf("n6" )
66 LABELN7 = sprintf("n7" )
67
68 unset key
69
70 labelxpos = .1
71 labelypos = .5
72
73 # 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"
93   textcolor rgb "#4f2f2f"
94 plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):6 ls 3 notitle
95 unset label
96
97 plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):7 ls 1 notitle
98 if(a>=4)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):8 ls 1 notitle
99 if(a>=5)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):9 ls 1 notitle
100 if(a>=6)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):10 ls 1 notitle
101 if(a>=7)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):11 ls 1 notitle
102 if(a>=8)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):12 ls 1 notitle
103 if(a>=9)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):13 ls 1 notitle
104 if(a>=10)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):14 ls 1 notitle
105 if(a>=11)plot inputfile u ($2 < limit ? $6: 1/0):15 ls 1 notitle
106
107 # 3.
108 plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):5 ls 1 notitle
109 plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):6 ls 1 notitle
110
111 set label at graph labelxpos, labelypos center LABELZ front left font "Arial,24"
112   textcolor rgb "#4f2f2f"
113 plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):7 ls 3 notitle
114 unset label
115
116 if(a>=4)plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):8 ls 1 notitle
117 if(a>=5)plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):9 ls 1 notitle
118 if(a>=6)plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):10 ls 1 notitle
119 if(a>=7)plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):11 ls 1 notitle
120 if(a>=8)plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):12 ls 1 notitle
121 if(a>=9)plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):13 ls 1 notitle
122 if(a>=10)plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):14 ls 1 notitle
123 if(a>=11)plot inputfile u ($2 < limit ? $7: 1/0):15 ls 1 notitle
124
125 # 4.
126 if(a>3)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):5 ls 1 notitle
127 if(a>3)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):6 ls 1 notitle
128 if(a>3)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):7 ls 1 notitle
129
130 set label at graph labelxpos, labelypos center LABELN0 front left font "Arial,24"
131   textcolor rgb "#4f2f2f"
132 if(a>=4)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):8 ls 3 notitle
133 unset label
134
135 if(a>=5)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):9 ls 1 notitle
136 if(a>=6)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):10 ls 1 notitle
137 if(a>=7)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):11 ls 1 notitle
138 if(a>=8)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):12 ls 1 notitle
139 if(a>=9)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):13 ls 1 notitle
140 if(a>=10)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):14 ls 1 notitle
141 if(a>=11)plot inputfile u ($2 < limit ? $8: 1/0):15 ls 1 notitle
142
143 # 5.
144 if(a>3)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):5 ls 1 notitle
145 if(a>3)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):6 ls 1 notitle
146 if(a>3)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):7 ls 1 notitle
147 if(a>3)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):8 ls 1 notitle
148
149 set label at graph labelxpos, labelypos center LABELN1 front left font "Arial,24"
150   textcolor rgb "#4f2f2f"
151 if(a>=5)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):9 ls 3 notitle
152 unset label
153
154 if(a>=6)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):10 ls 1 notitle
155 if(a>=7)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):11 ls 1 notitle
156 if(a>=8)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):12 ls 1 notitle
157 if(a>=9)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):13 ls 1 notitle
158 if(a>=10)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):14 ls 1 notitle
159 if(a>=11)plot inputfile u ($2 < limit ? $9: 1/0):15 ls 1 notitle
160
161 # 6.
162 if(a>3)plot inputfile u ($2 < limit ? $10: 1/0):5 ls 1 notitle
163 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" textcolor rgb "#4f2f2f"
254 if(a>=11)      plot inputfile u ($2 < limit ? $15: 1/0):15 ls 1 notitle
255 if(a>=11)      unset label
256
257
258 i=i+1
259
260 unset multiplot
261
262 if ( i < m) reread
263 i=0
264 #print "rm ".ObjectiveOut.remove( ObjectiveOut )
265 #print "rm ".SigmaOut.remove( SigmaOut )
266 #print "rm ".FitnessOut.remove( FitnessOut )
267 #print "rm ".EvalOut.remove( EvalOut )
```

--

--

--

Literaturverzeichnis

- [1] BORGWERTH, Bernd ; GNIP, Christoph: Abschätzung der Wellenzahl durch Korrelation mit Kalibrierpunkten. (2012)
- [2] BRONSTEJN, 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=6BvvAAAAMAAJ>. – 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