

Genauigkeit eines Lokalisierungssystems für aktive RFID-Tags

In diesem Artikel werden die Lokalisierungseigenschaften des RFID-Systems ZOMOFI der Firma Siemens AG untersucht. Zwei Fragestellungen werden beantwortet: Wie gross ist die Fehlerfläche bei der Lokalisierung unter der Bedingung, dass die Signalausbreitung der RFID-Leser genau kreisförmig ist und welchen Einfluss hat die Lage der RFID-Leser auf die Präzision, mit der ein Objekt lokalisiert wird?

Zdena Koukolikova, Carlo Nicola, Christoph Stamm | carlo.nicola@fhnw.ch

Im Bereich verteilter und mobiler Softwaresysteme spielen «intelligente Sensoren» (wie RFID: Radio Frequency Identification) eine grundlegende Rolle. Von ihnen hängt nicht nur der Grad der Granularität bei der Erfassung der einzelnen Elemente innerhalb eines Systems ab, sondern von ihnen wird auch die Grenze bestimmt, innerhalb der dezentrale Sensoren autonom entscheiden können.

Seit einigen Jahren erforschen wir am Institut für Mobile und Verteilte Systeme, wie die Signale von RFID-Sensoren zuverlässig erfasst, übers Internet verteilt und in einer Applikation integriert und analysiert werden können. Wir haben mit dem Problem des *track and trace* von Luxusgütern (am Beispiel von Weinflaschen des oberen Preissegments) begonnen, bei dessen Lösung neben den klassischen 1D- und 2D-Barcodes auch einfache RFID-Etiketten benutzt wurden [NK02]. Besonderes Gewicht wurde auf die Mobilität der Erfassung der Daten gelegt, weswegen Mobiltelefone als RFID-Lesegeräte eingesetzt wurden. In einem anderen Projekt untersuchten wir in Zusammenarbeit mit der Firma Siemens, wie weit sich das Mobiltelefon mit einer NFC-RFID-Schnittstelle (NFC: *Near Field Communication*) als intelligenten Sensor umfunktionieren lässt. Dabei entwickelten wir erfolgreich Prototypen für die sichere Barbezahlung von Musikstücken (*music on demand*) mit Mobiltelefonen und RFID. Der gleiche NFC-Ansatz wurde dann konkret in einem Projekt zur Entwicklung eines intelligenten Schrankes mit der Firma Lista angewendet. «Intelligent» bedeutet hier, dass jede Materialentnahme bzw. Einlage im Schrank in Echtzeit an eine Datenbank nicht nur mitgeteilt wird (automatische bzw. chaotische Lagerverwaltung), sondern auch dass jegliche Materialveränderung nur von authentifizierten und autorisierten Personen durchgeführt werden kann. Sowohl die Erkennung des gelagerten Materials als auch

die Authentifizierung der Personen erfolgen mit RFID-Technik.

Mit den bisher verwendeten passiven RFID-Tags [MW06] waren wir nur in der Lage, Objekte in geringer Distanz zu identifizieren, da passive RFID-Tags einen Teil der elektromagnetischen Energie des Lesevorgangs als Energiequelle benötigen. Eine allfällige Lokalisierung war zudem nur sehr ungenau möglich. Ein neues aktives RFID-Tag-System von Siemens, welches Radiosignale im 2.45 GHz-Bereich senden und empfangen kann, ermöglicht über die Objektidentifizierung hinaus die Lokalisierung des Objekts anhand der Stärke des Rücksignals. Aktive RFID-Tags sind zusätzlich mit langlebigen Batterien bestückt. Daher muss die Stärke des Lesesignals keine konstante Komponente für die Energieversorgung des Tags beinhalten. Dies hat den grossen Vorteil, dass grössere Reichweiten möglich sind.

In diesem Artikel beschreiben wir erste Untersuchungen mit aktiven RFID-Tags in einem von der KTI geförderten Projekt (INOLOG¹). Zusammen mit dem Institut für Business Engineering² und der PostLogistics entwickeln wir neue Ansätze zum Einsatz von aktiver RFID-Technologie in der Logistik. Konkret untersuchen wir, ob diese Technologie die Logistik von Paletten von verschiedenen zusammengesetzten Küchengeräten (WG: *white goods*) entscheidend vereinfachen und effizienter gestalten kann. Nach der genauen Problemstellung stellen wir das ZOMOFI-System zur Identifizierung und Lokalisierung aktiver RFID-Tags vor und kommen dann zum Hauptteil, wo wir die Lokalisierungseigenschaften von ZOMOFI genauer untersuchen. Anschliessend besprechen wir kurz eine Verfeinerung des Lokalisierungsalgorithmus mit einem probabilistischen Ansatz

¹ KTI-Projektnummer: 8912.1 PFES-ES
² Institut für Business-Engineering (IBE):
<http://www.fhnw.ch/technik/ibe>

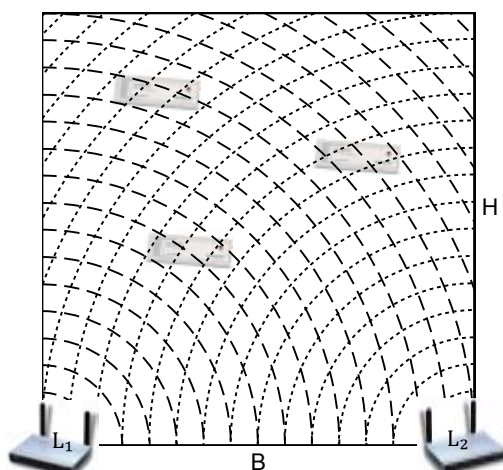


Abbildung 1: Die Lokalisierungszelle mit den zwei durch WLAN verbundenen RFID-Controllern L_1 und L_2 und drei aktiven RFID-Tags. Die Reichweite des Empfangssignals ist als ideale, kreiswellenförmige Begrenzung skizziert.

(*Bayes filtering*). Ein Ausblick aufs weitere Vorgehen rundet den Bericht ab.

Das konkrete Problem

Ein Lagerraum wird in quadratische Zellen unterteilt. Die Seitenlänge von 80 Metern entspricht dem maximalen Empfangsbereich des ZOMOFI-Controllers (R_{MAX}). Mindestens zwei Ecken jeder Zelle werden mit je einem Access Point, einem ZOMOFI-Controller (siehe Abbildung 1), versehen. Wir nennen so eine Zelle *Lokalisierungszelle*. Ein Gabelstapler transportiert eine mit verschiedenen Haushaltsgeräten bestückte Palette (WG-Ladung) in irgendeinen freien Bereich des Lagers. Die WG-Ladungen dürfen freilich auch vertikal aufgestapelt werden. Die Aufgabe der Lokalisierungszelle besteht darin, sowohl die Position der WG-Ladung innerhalb der Zelle als auch deren Zusammensetzung zu bestimmen. Jede WG-Ladung wird mit einem globalen aktiven RFID-Tag identifiziert und ihre einzelnen Haushaltsgeräte zusätzlich mit individuellen RFID-Tags gekennzeichnet. Das Sammeln dieser Information wird von einem Server gesteuert, der via WLAN mit den ZOMOFI-Controllern verbunden ist.

Das ZOMOFI System

Das hier untersuchte kommerzielle ZOMOFI System benutzt RFID-Leser und aktive Tags, die mit einer Frequenz von 2,4 GHz miteinander kommunizieren. Die RFID-Controller können über Ethernet, WiFi oder serielle Schnittstelle (RS-485) gesteuert werden.

Ein RFID-Controller kann den Inhalt von maximal 80 Tags pro Sekunde analysieren und insgesamt etwa 1000 aktive RFID-Tags kontrollieren. Eine Besonderheit dieser RFID-Controller besteht darin, dass sie die Reichweite des empfangenen Signals stufenweise (in 32 Schritten, die via Applikation einfach programmierbar sind) kontrollieren können. Die maximale Reichweite beträgt etwa 80

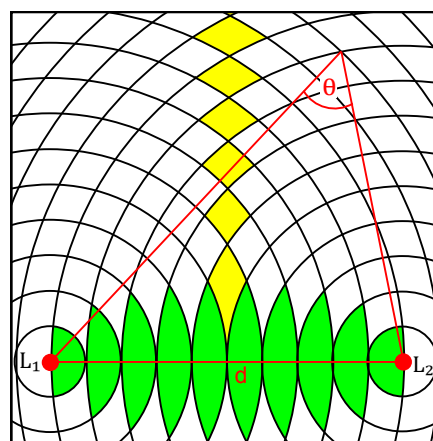


Abbildung 2: Die diskreten Ringe, welche durch die Abschwächungsstufen begrenzt werden, bestimmen für einen RFID-Controller den Ort, wo ein RFID-Tag lokalisiert werden kann. Die dazwischen liegenden, Rhombus-ähnlichen Flächen nennen wir Fehlerflächen. Die Grössen der Fehlerflächen hängen sowohl von der Position im Raum als auch von der Anordnung der Controller L_1 und L_2 ab.

Meter. Die aktiven RFID-Tags beinhalten in der Grundversion eine eindeutige ID, 112 Bytes benutzbaren Speicher, verschiedene programmierbare Funktionen wie z.B. *mute* und *beacon rate* und zudem eine Batterie, deren Lebensdauer etwa 8 Jahre beträgt. Spezielle Ausführungen der RFID-Tags können auch Bewegungs- bzw. Temperatursensoren beinhalten.

Lokalisierung von RFID-Tags

Ein aktives RFID-Tag, welches periodisch ein Radiosignal sendet, kann mit einem Peilgerät lokalisiert werden. Man müsste im Prinzip also nichts anderes tun, als ein RFID-Lesegerät so zu modifizieren, dass es durch kontrollierte Abschwächung der Empfangsempfindlichkeit die Schwelle der Empfangsreichweite des Signals des RFID-Tags bestimmt. Dadurch kann die Distanz zwischen RFID-Controller und RFID-Tag abgeschätzt werden (falls davon ausgegangen werden kann, dass die Ausbreitungsmerkmale einigermaßen gut bekannt sind). Sobald jedoch mehrere Peilgeräte (in unserem Fall ZOMOFI-Controller) vorhanden sind, können die gewünschten (x,y) -Koordinaten mithilfe einfacher geometrischer Berechnungen ermittelt werden, wobei eine Unschärfe infolge der diskreten Abschwächung der Empfangsempfindlichkeit bleibt. Die der Unschärfe entsprechenden geometrischen Flächen nennen wir fortan Fehlerflächen (siehe Abbildung 2). Eine solche Fehlerfläche bestimmt schliesslich den Bereich, worin der RFID-Controller die gleichen (x,y) -Koordinaten für verschiedene Objekte misst. Die Grössen der Fehlerflächen variieren stark je nach Position im Raum und der Anordnung der Controller. Andere Eigenschaften von elektromagnetischen Systemen (z.B. Reflexionen, konstruktive und destruktive

tive Interferenz und Beugung der verschiedenen RF-Signale), welche zu weiteren Ungenauigkeiten führen, sollen erst im späteren Verlauf des Projektes mitberücksichtigt werden. Dabei stellen sich verschiedene Fragen: Zum Beispiel, wie viele Controller sind erforderlich und wie sollen sie im Raum angeordnet werden, damit die Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Position minimiert werden kann?

Das Modell

Zur Beantwortung der zuvor aufgeworfenen Frage nach der Anzahl von Controllern und deren räumlichen Anordnung führen wir vorerst einige Analysen und Matlab-Simulationen durch. Das zugrundeliegende Modell ist nachfolgend detailliert beschrieben. Die Ergebnisse der Analysen und Simulationen sollen dann in einem späteren Projektschritt in einem 1:1-Experiment verifiziert werden.

Wir betrachten in 2D eine rechteckige Zelle (mit Seitenlängen B und H) vorerst mit zwei RFID-Controllern L_1 und L_2 . L_1 und L_2 werden in zwei nebeneinander liegenden Ecken platziert (siehe Abbildung 1). Eine solche Anordnung ist derjenigen vorzuziehen, wo die beiden Controller in gegenüberliegenden Ecken platziert werden, weil insgesamt mehr unterschiedliche Fehlerflächen entstehen und diese somit im Mittel eine kleinere Ausdehnung, also eine kleinere Unsicherheit, haben. Dieser Anordnung legen wir ein kartesisches Koordinatensystem zu Grunde, so dass L_1 im Ursprung des Koordinatensystems liegt und L_2 an der Position $(B, 0)$. Nun ist hinlänglich bekannt (siehe z.B. [Pro95]), dass ein Radiosignal auf seinem Weg zum Empfänger durch räumliche Hindernisse, durch Beugung, Interferenz und Absorption in den Wänden abgeschwächt wird. Dadurch nimmt die Empfangsstärke Pr in der Praxis nicht nur quadratisch mit der Distanz R , sondern oft kubisch oder noch stärker ab:

$$Pr = K \cdot R^{-\lambda}$$

In dieser Formel ist R die Distanz zwischen Controller und Tag, λ der Dämpfungsfaktor ($2 \leq \lambda \leq 4$) und K eine Konstante, welche die Frequenz und den S/N-Faktor des ZOMOFI-Controllers subsumiert. Wenn K und λ für beide Controller bekannt sind, lassen sich aus den zwei Empfangsstärken Pr_j ($j \in \{1, 2\}$) die beiden Distanzen R_j abschätzen. Danach gilt es folgendes (überbestimmtes) Gleichungssystem zu lösen, um die (x,y) -Koordinate des Tags zu erhalten:

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 &= R_1^2 \\ (B - x)^2 + y^2 &= R_2^2 \\ 0 &\leq x \leq B \\ 0 &\leq y \leq H \end{aligned}$$

Wenn man bedenkt, dass in unseren Lokalisierungszellen etwa 850 Europaletten (1,2 m × 0,8 m) Platz haben und mehrere Lokalisierungszellen in einer Lagerhalle vorhanden sind, ist der Rechenaufwand für die Berechnung der (x,y) -Koordinaten

recht hoch. Dazu treten noch verschiedene technische Schwierigkeiten auf, die eine analytische Lösung des Problems erschweren (siehe auch [BM02]).

Wir nutzen die Möglichkeit des ZOMOFI-Controllers, die Empfangsempfindlichkeit *schrittweise* zu verkleinern, um den Aufwand zur Bestimmung der Position in einem vernünftigen Rahmen zu halten. Die Reduktion der Empfangsempfindlichkeit wird durch einen Dämpfungsparameter n ($1 \leq n \leq 32$) erreicht. Die nichtlineare Abhängigkeit der Empfangsempfindlichkeit von der Distanz wird bereits im Controller berücksichtigt, so dass die resultierenden Radien R einfach als R_{MAX}/n angenommen werden können.

Mit der schrittweisen Reduktion handeln wir uns aber auch eine erhöhte Unsicherheit über die genaue RFID-Tag-Position ein. Zur Abschätzung der Distanzen R_j gehen wir von folgenden zwei stark vereinfachenden Annahmen aus: 1. Das Radiosignal breitet sich als Kugelwelle aus (was nur im freien Raum gültig ist) und 2. die Reichweite des Controllers bildet in der 2D-Ebene Kreise, deren Radius R linear mit dem programmierbaren Dämpfungsparameter n abnimmt. Mit diesen zwei Annahmen kann man nun wie folgt vorgehen:

- Die Reichweite von L_1 wird schrittweise reduziert bis zu demjenigen Wert n_1 , unter dem das Tag nicht mehr identifizierbar ist. Dieser Schwellwert bestimmt die erste Abschätzung der Distanz R_1 zwischen L_1 und dem RFID-Tag: $R_1 = H \cdot n_1 / 32$.
- Man verfährt ähnlich mit L_2 und bestimmt dabei die Distanz R_2 zwischen L_2 und dem RFID-Tag: $R_2 = B \cdot n_2 / 32$.
- Die (x,y) -Koordinaten lassen sich wie folgt berechnen: $x = (R_1^2 - R_2^2 + B^2) / (2B)$; $y = \sqrt{(R_1^2 - x^2)}$.
- Diese Koordinaten (x,y) können eventuell als Ausgangspunkt für einen probabilistischen Algorithmus dienen, der die Koordinaten schärfer eingrenzen kann.

Analytische Lösung für zwei Controller

Die Fehlerfläche für zwei Controller gemäss Abbildung 2 können relativ einfach analytisch bestimmt werden. Dazu halten wir den Radius eines Controllers (L_1) konstant und denjenigen des anderen Controllers (L_2) variieren wir in Schritten von 2,5 m ($\Delta = R_{MAX}/32$). Die Berechnung der Linsenschnittfläche $A(a,b)$ zwischen zwei Kreisen mit Radien a und b ist in [Wei] angegeben. Durch einfache algebraische Manipulation erhalten wir folgende Formel für die Rhombus ähnliche Fehlerflächen:

$$A_x = \frac{1}{2} (A(R_1 + \Delta, R_2 + \Delta) + A(R_1, R_2) - A(R_1, R_2 + \Delta) - A(R_1 + \Delta, R_2))$$

wobei:

R_1 : Radius des 1. Controllers

R_2 : Radius des 2. Controllers

Δ : Inkrementschritt (2.5 m)

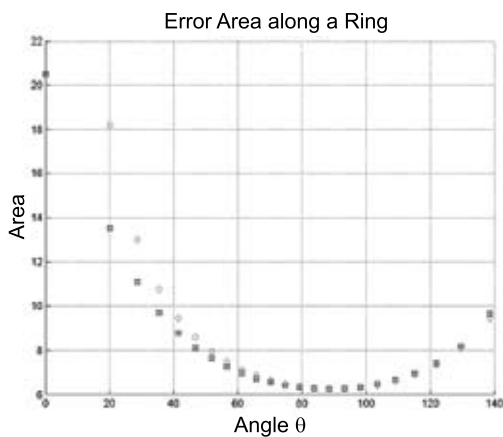


Abbildung 3: Die Fehlerfläche A_x (analytisch berechnet) als Funktion des Winkels θ für zwei Controller, angeordnet wie in Abbildung 2. $R_1 = 30$ m (konstant), $R_2 = 52.5$ m bis 107.5 und $\Delta = 2.5$ m. Der Abstand d zwischen den zwei Controllern beträgt 80 m. (□): Berechnet mit dem analytischen Modell. (○): Berechnet mit dem Programm [Vak]. (◇): Berechnet mit der Approximation von [NSB03]: $A_x = 4\varepsilon^2/\sin(\theta)$, wobei $\varepsilon = \Delta/2 = 1.25$ m. Der Winkel θ wird gemäss dem Kosinussatz für alle Messpunkte berechnet: $\theta = \arccos(d^2 - R_1^2 - R_2^2)/(2R_1R_2)$.

Die Abbildung 3 zeigt die Fehlerfläche A_x in Funktion des Zwischenwinkels θ (dargestellt in Abbildung 2) bei festgelegtem R_1 von 30 Metern.

Die Grösse und Varianz der Fehlerflächen A_x sind zudem abhängig vom Abstand d zwischen den beiden Controllern (siehe Abbildung 4). Ein grobes Mass des optimalen Abstands d kann somit aus dem Verlauf der Ableitungskurve $\partial A_x(R_1, R_2, d)/\partial d$ als Funktion von d bestimmt werden. Für den Fall, dargestellt in der Abbildung 3 ($R_1, R_2 =$ konstant), beträgt $d_{opt} = 55$ m. Dies gilt aber höchstens als Mass für die Unsicherheit einer einzelnen Messung. Man sollte eher den durchschnittlichen Messfehler über alle Fehlerflächen bestimmen. Dabei gilt, dass die Summe aller Fehlerflächen ge-

nau der Fläche der Lokalisierungszelle entspricht. Mit anderen Worten, je mehr Fehlerflächen eine Lokalisierungszelle enthält, desto kleiner wird der durchschnittliche Fehler. Bei der folgenden Konfiguration der beiden ZOMOFI-Controller ($L_1 = (0,0)$ und $L_2 = (80,0)$) beträgt die durchschnittliche Fehlerfläche 7.4 m^2 bei einer Standardabweichung von $\sigma = \pm 1.9 \text{ m}^2$.

Falls die beiden Controller sich in zwei verschiedenen Ecken der Lokalisierungszelle befinden, d.h. deren Distanz d möglichst gross ist, so befinden sich die grössten Fehlerflächen entlang der Verbindungslinie zwischen den beiden Controllern (siehe Abbildung 4a). Daraus lässt sich ableiten, dass die beiden Controller auf der gleichen Seite der Lokalisierungszelle liegen sollen. Denn dadurch liegen die grossen Fehlerflächen entlang der Verbindungslinie nur zur Hälfte in der Lokalisierungszelle drin.

Lösung für drei Controller

Bei drei Controllern verzichten wir auf eine analytische Berechnung der Fehlerflächen und nutzen stattdessen numerische Simulationen. Mit Hilfe eines Matlab-Programms simulieren wir, wie sich die Fehlerflächen in Funktion der Position des RFID-Tags verhalten. Zur Berechnung der Fehlerflächen verwenden wir ein Programm, welches auf einem Kreisschnitt-Programm von A. Vakulenko [Vak] basiert. Um die Korrektheit unseres Programms abschätzen zu können, haben wir die Resultate mit den analytischen Berechnungen verglichen (siehe Abbildung 3).

Obwohl unser Programm erlaubt, dass die Controller beliebige Positionen innerhalb der Lokalisierungszelle annehmen, zeigen wir hier nur ein Beispiel unter den vielen möglichen Konfigurationen (siehe Abbildung 5). In dieser Konfiguration sind zwei Controller fest in je einer der unteren Ecken und der dritte in der Mitte der oberen Kan-

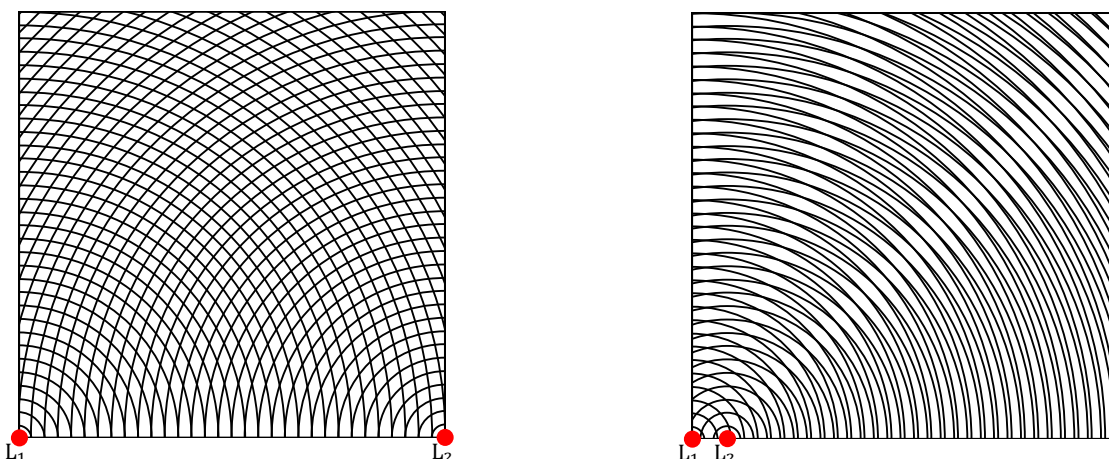


Abbildung 4: Die Grössen der Fehlerflächen hängen stark von der Distanz d zwischen den beiden Controllern ab. a) Bei einem grossen d sind die grössten Fehlerflächen nur entlang der direkten Verbindung der beiden Controller zu finden. b) Bei einem kleinen d treten Moiré-Effekte auf, welche mit wenigen grossen Fehlerflächen einhergehen.

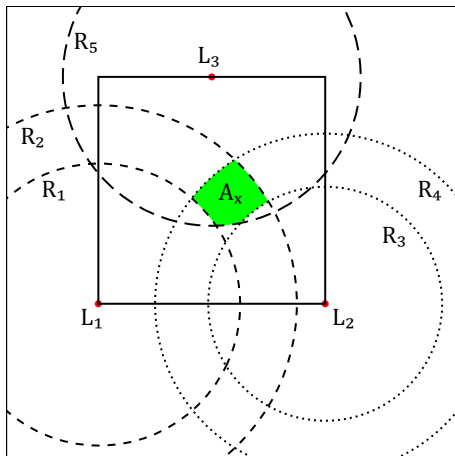


Abbildung 5: Bestimmung der Fehlerfläche A_x gemäss Variante a) bei drei Controllern L_1 , L_2 und L_3 .

te der Lokalisierungszelle verankert: $L_1 = (0,0)$, $L_2 = (B,0)$ und $L_3 = (\frac{1}{2}B,H)$. Es gibt jeweils zwei Kreise (Signale), die von den Controllern L_1 und L_2 ausgehen. Die zwei Kreise links entsprechen den Signalen mit Radius R_1 und R_2 ; die zwei rechts den Signalen mit Radius R_3 und R_4 . Da nur die Signale mit Radius R_2 und R_4 die WG-Ladung detektieren, kann sich diese nur innerhalb der Überlappungszone der zwei Kreise befinden. Wir können aber diese Unsicherheitszone beträchtlich einschränken, wenn wir auch die Information einbeziehen, dass die WG-Ladung nicht innerhalb der Kreise R_1 und R_3 liegt. Die Ladung kann sich somit nur dort befinden, wo sich die beiden Ringe, begrenzt durch die Kreise R_1 und R_2 bzw. R_3 und R_4 , überlappen. Mithilfe des dritten Signals kann man nun bestimmen, ob die WG-Ladung in der oberen oder der unteren Überlappungsfläche liegt und in welchem Teilbereich.

Die Position der WG-Ladung wird somit wie folgt ermittelt:

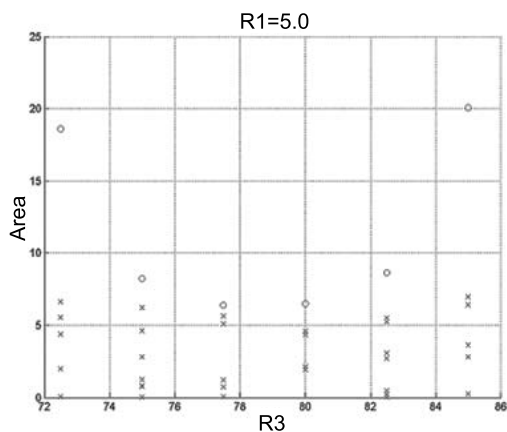


Abbildung 7: Grösse der Fehlerflächen in einem Vertikalschnitt der Abbildung 6. (o): zwei Controller. (x): drei Controller.

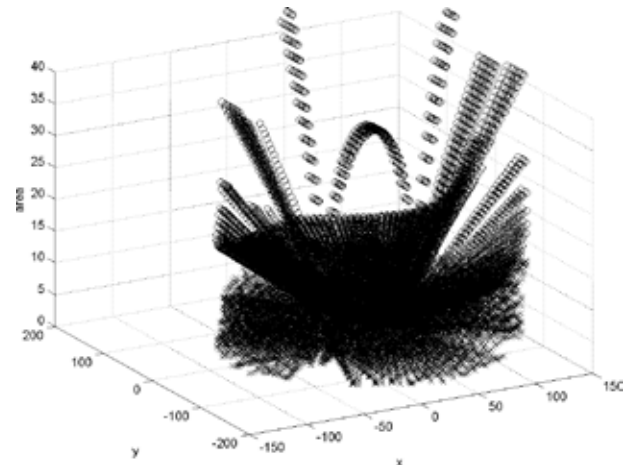


Abbildung 6: Grösse der Fehlerflächen (z-Achse) für eine fixe Stellung der Controller. (o): zwei Controller $L_1 = (0,0)$ und $L_2 = (80,0)$. (x): drei Controller $L_1 = (0,0)$, $L_2 = (80,0)$ und $L_3 = (40,80)$.

1. Es wird für jeden der drei Controller bestimmt, welchen Radius das Signal haben muss, damit es möglichst knapp die WG-Ladung detektieren kann. Dies bestimmt die folgenden Werte: L_1 : Radius R_2 , L_2 : Radius R_4 und L_3 : Radius R_5 .
2. Um die Fehlerfläche für die Position der WG-Ladung zu berechnen, brauchen wir noch für L_1 und L_2 die Werte der vorherigen Radii, innerhalb deren die WG-Ladung nicht detektiert werden kann: L_1 : Radius $R_1 = R_2 - \Delta$ und L_2 : Radius $R_3 = R_4 - \Delta$.

Das von uns verwendete Kreisschnitt-Programm berechnet die Flächen, wo sich mehrere Kreise überlappen, wobei die Anzahl der überlappenden Kreise frei wählbar ist. Wir benützen für unsere Berechnungen die Überlappungsflächen von jeweils zwei (A_{xy}) und drei (A_{xyz}) der fünf verschiedenen Kreise. Mit Hilfe solcher 2-Kreis- und 3-Kreis-Überlappungsflächen können die Unsicherheitszonen einfach berechnet werden. Je nach dem wie der

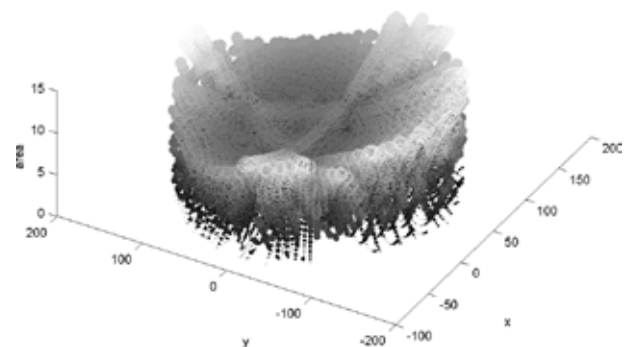


Abbildung 8: Grösse der Fehlerflächen für alle Punkte in einer mit drei Controllern (gleiche Anordnung wie in Abbildung 6). Helle Punkte: grosse Fehlerflächen; dunkle Punkte: kleine Fehlerflächen. Die eigentliche Lokalisierungszelle erstreckt sich von 0 bis +80 m auf beiden x,y-Achsen.

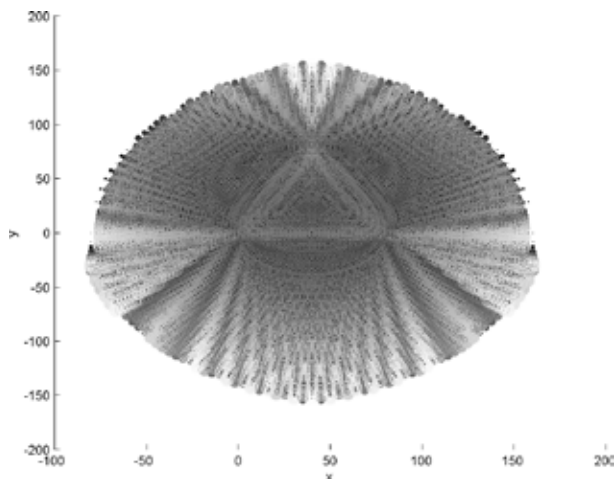


Abbildung 9: Parallelprojektion der Abbildung 8 (z=0). Helle Punkte: grosse Fehlerflächen; dunkle Punkte: kleine Fehlerflächen

Kreis mit Radius R_5 die anderen vier Kreise schneidet, wird eine der folgenden drei Formeln angewendet:

- a) $A_x = A_{245} - A_{145} - A_{235} + A_{135}$
- b) $A_x = A_{245} - A_{145} - A_{235} + A_{135} - \frac{1}{2}(A_{24} - A_{14} - A_{23} + A_{13})$
- c) $A_x = \frac{1}{2}(A_{245} - A_{145} - A_{235} + A_{135})$

Resultate

Die Fehlerflächen, sind in der Abbildung 6 für zwei Konfigurationen von Controllern dargestellt, wobei die z-Achse die Grösse der Fehlerflächen in Quadratmeter angibt. Kreissymbole entsprechen den Fehlerflächen der Konfiguration mit zwei Controllern $L_1 = (0,0)$ und $L_2 = (B,0)$ und Kreuze denjenigen der Konfiguration mit drei Controllern $L_1 = (0,0)$, $L_2 = (B,0)$ und $L_3 = (\frac{1}{2}B,H)$. Aus der Abbildung 6 geht eindeutig hervor, dass die Konfiguration mit drei Controllern wesentlich kleinere Fehlerflächen aufweist. Diese Tatsache wird noch einmal von der Abbildung 7 bestätigt, welche einen Vertikalschnitt aus Abbildung 6 (Schnitt senkrecht zur x-y-Ebene) darstellt. Die Abbildung 7 zeigt die

Fehlerfläche in Funktion von R_3 mit R_1 als Parameter. Man beachte, dass R_2 und R_4 klar festgelegt sind (siehe Abbildung 5). Die Kreissymbole (o) liegen eindeutig höher als die Kreuze (x). Aus der Abbildung ist auch ersichtlich, dass die Werte von R_5 (Stapel von vertikalen Messpunkten (x) bei konstantem R_3) die Fehlerflächen vermindern.

In Abbildung 8 haben wir alle (x,y)-Koordinaten dargestellt, welche mit drei Controllern erreichbar sind. Der Grauton und die Grösse der Kreissymbole sind proportional zur Fehlerfläche, wobei ein heller Grauton eine grosse Fehlerfläche repräsentiert. Eine genaue Betrachtung der Grafik zeigt, dass die kritischen (grossen) Zonen entlang der Verbindungslinien zwischen den Controllern liegen und dass die Fehlerflächen sich im Bereich zwischen 0.01 m^2 und 13 m^2 bewegen. Eine Projektion dieser Grafik auf die x-y-Ebene ist in Abbildung 9 dargestellt. Sie zeigt die kritischen Zonen besonders klar an, wo die Fehlerflächen am grössten sind.

Die Frage nach der optimalen Anordnung der drei Controller in der Lokalisierungszelle ist damit natürlich noch nicht beantwortet. Aus der Analyse der Konfiguration mit zwei Controllern wissen wir, dass die grössten Fehlerflächen sich entlang der Verbindungslinie zwischen den Controllern befinden. Mithilfe des dritten Controllers können diese grossen Fehlerflächen jedoch auf knifflige Weise verkleinert werden, indem darauf geachtet wird, dass die Distanz vom dritten Controller zu seinen beiden Nachbarn nicht ein Vielfaches von Δ ist (siehe Abbildung 10).

Empirisch haben wir die folgenden vier Controller-Anordnungen grob untersucht. Die ersten drei Anordnungen basieren auf der optimalen Anordnung von zwei Controllern:

1. Konfiguration A: $L_1 = (0,0)$; $L_2 = (B,0)$; $L_3 = (\frac{1}{2}B,H)$
2. Konfiguration B: $L_1 = (0,0)$; $L_2 = (B,0)$; $L_3 = (B,H)$
3. Konfiguration C: $L_1 = (0,0)$; $L_2 = (B,0)$; $L_3 = (\frac{3}{4}B,H)$
4. Konfiguration D: $L_1 = (0,0)$; $L_2 = (B,0)$; $L_3 = (\frac{1}{2}B,\frac{1}{2}H)$

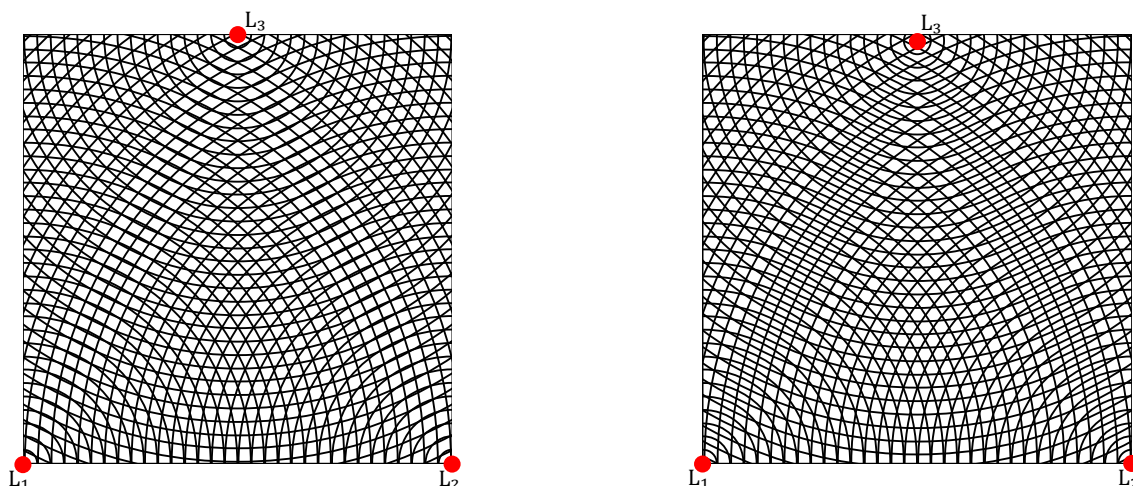


Abbildung 10: a) Konfiguration A mit drei Controllern: die grössten Fehlerflächen liegen in einem breiten Band entlang der direkten Verbindungen zwischen den Controllern. b) Der dritte Controller ist um ein halbes Δ in y-Richtung verschoben worden.

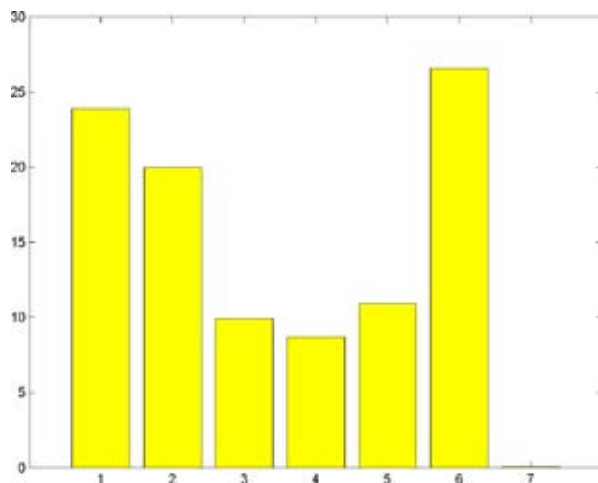


Abbildung 11: Verteilung der Fehlerflächen in Prozent in Funktion deren Mittelwertklasse (Mittelwert $\pm n \cdot \sigma$ [$n = 1, 2, \dots, 7$]). Mittelwertklassen: Kategorie 1: Fehlerfläche $< 0.6 \text{ m}^2$; Kategorie 2: $0.6 \text{ m}^2 < \text{Fehlerfläche} < 1.7 \text{ m}^2$; Kategorie 3: $1.7 \text{ m}^2 < \text{Fehlerfläche} < 2.7 \text{ m}^2$; Kategorie 4: $2.7 \text{ m}^2 < \text{Fehlerfläche} < 3.8 \text{ m}^2$; Kategorie 5: $3.8 \text{ m}^2 < \text{Fehlerfläche} < 4.8 \text{ m}^2$; Kategorie 6: $4.8 \text{ m}^2 < \text{Fehlerfläche} < 6.9 \text{ m}^2$; Kategorie 7: Fehlerfläche $> 6.9 \text{ m}^2$.

Die Abbildung 11 zeigt die Verteilung der Fehlerflächen für die Konfiguration A, welche 2462 Fehlerflächen im Innern der Lokalisierungszelle beinhaltet und deren durchschnittliche Fläche 2.7 m^2 beträgt mit einem $\sigma = \pm 2.1 \text{ m}^2$.

Die Simulationen ergeben kein eindeutiges Resultat. Lediglich die Konfiguration B enthält etwa 20% mehr Positionen mit kleineren Fehlerflächen als die schlechteste Konfiguration D, was nicht verwunderlich ist in Anbetracht der Tatsache, dass mit kleinsten Positionsänderungen (z. B. $\frac{1}{2} \Delta$) bereits sehr stark unterschiedliche Verteilungen der Fehlerflächen erzielt werden können.

Ausblick

Die kleineren Fehlerflächen, welche die Konfiguration A liefert, deuten auf eine mögliche Verbesserung des Lokalisierungsverfahrens hin:

1. Man permutiert die Reihenfolge, mit der die Controller L_i gestartet werden (z. B. $P = (1, 2, 3)$, $(2, 3, 1)$ oder $(1, 3, 2)$), um einerseits systematische Fehler der Geräte zu vermeiden und um andererseits eine bessere Bayes'sche Prior-Verteilung zu berechnen und bestimmt mit dem bereits besprochenen Verfahren für jede Permutation die entsprechenden (x_p, y_p) Koordinaten.
2. Die drei verschiedenen Koordinaten-Paare bilden den Ausgangspunkt eines *Bayesian Location Estimation* Algorithmus [AMGC02], um die durch Interferenz und Rauschen verursachten Fehler zu verringern.

Referenzen

- [AMGC02] Arulampalam, S., Maskell, S., Gordon, N., Clapp, T. A Tutorial on ParticleFilters for On-line Non-linear/Non-Gaussian Bayesian Tracking. *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol. 50, No. 2, 174-188, 2002.
- [BM02] Bergamo, P., Mazzini, G. Localization in Sensors Networks with Fading and Mobility. *IEEE PIMRC*, 750-754, 2002.
- [MW06] Marzucco, G., Wyss, M. RFID Lagerschrankverwaltung. Diplomarbeit der FHNW, November 2006.
- [NK02] Nicola, C.U., Koukolikova, Z. Stamping out fraud in luxury goods. 2002. <http://lis.fh-aargau.ch/src/wbi.pdf>
- [NSB03] Nagpal R., Shrobe H., Bachrach J., Organizing a Global Coordinate System from Local Information on an Ad Hoc Sensor Network, 2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '03), Palo Alto, April, 2003
- [Pro95] Proakis, J. G. *Digital Communications*. McGraw-Hill Intern. Ed., 3. Auflage, 1995.
- [Vak] Vakulenko, A. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange>
- [Wei] Weisstein, E. W. Circle-Circle Intersection. <http://mathworld.wolfram.com/Circle-CircleIntersection.html>