

Kapitel 1.

Einführung

Die Kenntnis über die Lagerposition ist eine der wichtigsten Informationen in der Logistik. Teure Suchprozesse im Lager gehören jedoch immer noch zur Tagesordnung. Jedes Mal, wenn ein Objekt nicht an dem erwarteten Ort zu finden ist, sind manuelle Suchprozesse notwendig. Die Ursachen für Suchprozesse sind vielfältig: Schwund, Fehlbuchungen, temporäre Umräumungen, Verwechslungen. Viele Unternehmen besitzen keine oder nur eine rudimentäre Stellplatzverwaltung. Die effiziente Verwaltung eines Lagers erfordert jedoch eine genaue Zuordnung von Ladeeinheit zu Stellplatz. Daher stehen für Transport-, Umschlags- und Lagerprozesse auch eine Vielzahl an Methoden und Systemen zur Lagerorganisation und Koordination des Materialflusses und Identifikation von Ladeeinheiten und Artikeln zur Verfügung. Die Wahl ist unter anderem abhängig von der Häufigkeit der Identifikationsprozesse und deren systemseitiger Erfassung, der Komplexität der Handhabungsprozesse, der Größe des Areals, der Höhe der Such- oder Fehlerkosten, dem Einzelpreis der Lokalisierungsobjekte, der Wiederbeschaffungszeit und nicht zuletzt den Kosten für ein unterstützendes System. Aus diesen Kriterien leitet sich der Grad der Automatisierung im Lager ab. Werden Objekte weitestgehend automatisiert transportiert und ein- oder ausgelagert wie beispielsweise in einem Hochregallager mit einem automatischen Regalbediengerät, erfolgt die Positionsangabe durch das überliegende IT-System. Bei einem geringeren Automatisierungsgrad oder anderer Lagerstrategie erfolgen Transport- und Lagerprozesse manuell mit Flurförderzeugen. Auch hier kann ein IT-System den Lagermitarbeiter durch Stellplatzangaben unterstützen und durch Scannen eines Stellplatzbarcodes auch kontrollieren. Sowohl bei dieser Variante als auch bei gänzlich ungeführten Lagerprozessen ist Raum für Fehler vorhanden. Diese Fehler¹ sind oft durch Mitarbeiterverhalten verursacht. Neben mangelnder Disziplin der Mitarbeiter sind auch zu starre Systeme oder schlicht die hohe Dynamik auf knappen Logistikflächen die Ursache für zeitintensive Suchprozesse. Die entstehenden Suchkosten machen aus Projekterfahrung 5-10 % der Logistikkosten aus.

Eine Möglichkeit, die Suchkosten zu reduzieren, besteht in einer Lokalisierungslösung. Heute ist eine Lokalisierung von Waren im Lager mit einem hohen Aufwand verbunden. Verfügbare Lokalisierungssysteme erfordern eine kostenintensive Bestückung der Ladeeinheiten mit Sendern und einen verhältnismäßig hohen Aufwand in der Installation der Empfänger. Die vorliegende Arbeit soll diese Ausgangs-

¹Häufige Fehler bei Ein- und Auslagerprozessen sind: Das Objekt wird falsch eingelagert, aber der richtige Stellplatz-Barcode gescannt (oder Eingabe der richtigen Checknummer des Stellplatzes), ein Transport wird bestätigt, aber tatsächlich nicht durchgeführt.

finden ist. Seit Jahrzehnten ist dies das prominenteste Forschungsthema in diesem Bereich. Mit der vermehrten Nutzung der UHF-Technologie in der Logistik wurde diese auch auf das mobile-robot-Problem angewendet, aber vornehmlich auf die Lokalisierung von entsprechenden Transpondern im Freiraum. Da die Lösung dieser Anwendung unter den Umständen eines sich bewegenden Roboters und unter Nutzung der vorhandenen Sensordaten schwer und bislang unbefriedigend durchzuführen ist, wurden andere, aus der Lokalisierungstheorie bekannte Verfahren adaptiv mit der UHF-Technologie verknüpft. Die Aufgabenstellung als solche ist jedoch nicht mit dem hier thematisierten Lokalisierungsvorhaben vergleichbar, da sich kein mobiles Objekt selbst lokalisieren soll, sondern statische Transponder von festen Antennenpositionen. Dennoch können aus den betrachteten Forschungsarbeiten Ansätze übernommen werden.

Lokalisierungsverfahren im Freiraum lassen sich per Definition nicht auf das vorliegende Problem übertragen, da die Vorteile der Freiraummessung (insbesondere keine Multipath-Effekte) in einem Palettenregallager nicht anwendbar sind. Insgesamt ist daher kein System vorhanden, welches sich für die beschriebene Aufgabenstellung einsetzen lässt. Das System, das am ehesten vergleichbar ist mit dem hier zu entwickelnden System, wird vom Hersteller Mojix angeboten. Es werden ebenfalls passive UHF-Transponder lokalisiert, jedoch ist der originäre Einsatzfall die Identifikation von vielen Transpondern auf einer vergleichbar großen Fläche. Die Lokalisierung ist dabei ein Nebeneffekt, welcher über ein klassisches Nachbarschaftsverfahren erreicht wird. Somit ist die Auflösung wesentlich von der Anzahl der Antennen abhängig, die im Lokalisierungsraum verteilt sind. Im Datenblatt wird eine Auflösung von kleiner 1 m angegeben (Mojix, 2009, S. 2). Es bleibt jedoch zu vermuten, dass dies eine Angabe unter optimalen Umständen im Freiraum sein muss. Eine Installation durch das Unternehmen selbst auf einer Versuchsfläche des Fraunhofer IML hat gezeigt, dass dieser Wert - auch unter Zuhilfenahme einer Vielzahl von Antennen direkt über dem zu lokalisierenden Bereich installiert - nicht erreicht werden konnte. Eine Nutzung des Systems wie in dem hier beschriebenen Einsatzszenario ist demnach nicht vorstellbar, da die Schwierigkeiten durch Absorption und Multipath-Effekte ebenso gelten.

Zusätzliche Hardware, die Information zur Auswertung liefert, erleichtert sicherlich die Lokalisierungsaufgabe, verkompliziert aber den Systemaufbau und soll daher nicht genutzt werden, da das Ziel einer Lokalisierungslösung in der Lagerlogistik eine möglichst einfache Lösung sein soll.

Nichtsdestotrotz kann eine Vielzahl von Ansätzen für das zu entwickelnde Lokalisierungssystem berücksichtigt werden, die bei der Lektüre der hier vorgestellten Aufsätze und Dissertationen aufgefallen sind.

1.3. Beschreibung der Forschungslücke und des Forschungsansatzes

Den ersten beiden Abschnitten des ersten Kapitels sind die Aufgabenstellung und der Stand der Wissenschaft zu entnehmen. Ziel dieses Abschnitts ist es, die Forschungslücke erst zu bestimmen und anschließend das Vorgehen zum Schließen die-

ser zu erläutern. Die Forschungslücke lässt sich der Übersicht halber in die folgenden Dimensionen einteilen:

- **Lokalisierungsumgebung.** Die Lokalisierungsumgebung, die in dieser Arbeit verwendet wird, ist durch Multipath-Effekte anspruchsvoll. Reflexionen entstehen durch das Regal selbst oder durch die Objekte im Regal. Gleichzeitig wird elektromagnetische Feldstärke durch Objekte im Regal (in diesem Beispiel gefüllte Wasserflaschen) absorbiert. Die entstehenden Sensorfehler werden in den oben stehenden Arbeiten (Mobile-Robot-Problem) zwar festgestellt, jedoch bleibt eine systematische Lösung des Problems aus.
- **Standardkomponenten.** Der zugrunde liegende Forschungsansatz sieht keine Nutzung von zusätzlicher Hardware vor, wie sie in Abschnitt 1.2 beschrieben ist. Demnach werden keine Komponenten genutzt, die auf der einen Seite sicherlich eine Lokalisierung erleichtern, aber auch auf der anderen Seite ein Gesamtsystem komplexer machen. Dies ist zu begründen durch den Einsatzbereich des Systems. Ein solches System kann bei Kunden eingesetzt werden, die aufgrund ihrer Umschlagshäufigkeit über keine automatische Lösung verfügen und aufgrund der hohen Investitionen kein kommerzielles Lokalisierungssystem anschaffen können. Eine reine softwarebasierte Lokalisierung im UHF-Bereich in dieser beschriebenen Umgebung konnte bei der Recherche nicht gefunden werden.
- **Lokalisierungsobjekte.** Bei den Objekten, die es zu lokalisieren gilt, handelt es sich um drei Gruppen von Objekten: Kartons aus Pappe ohne Füllung, Gitterboxen mit metallischen Komponenten und Europaletten mit gefüllten Wasserkisten. Alle drei Objektgruppen beeinflussen das elektromagnetische Feld auf unterschiedliche Art und Weise durch Multipath-Effekte oder Absorption. Jedoch sind nur selten in den gesichteten Arbeiten Angaben über unterschiedliche Objekte, Oberflächen oder unterschiedliche Transponder zu finden. Die Schwankungen der Ergebnisse, wie sie später in Abschnitt 3.2 auf Seite 61 beschrieben werden, unterstreichen jedoch die Wichtigkeit dieser Differenzierung. Gänzlich vermisst wird in allen Arbeiten eine Beachtung der Veränderung des elektromagnetischen Feldes durch unterschiedliche Objektgruppen und Transponder.
- **Ultrahochfrequenz.** Die Nutzung der Ultrahochfrequenz zur Lokalisierung ist der Verbreitung in der Logistik geschuldet. Neben logistischen Vorteilen (z. B. hohe Datenübertragungsrate zur Pulklesung) bringt UHF Nachteile mit sich, die andere Frequenzbereiche entbehren. So ist beispielsweise die Durchdringung von metallischen Objekten in niedrigeren Frequenzen eher möglich als im UHF-Bereich. Da dieser Frequenzbereich erst in den letzten Jahren an Popularität gewonnen hat, thematisieren viele der Arbeiten höhere Frequenzbereiche, die mit Sensoren mit einer höheren Reichweite (vornehmlich 2,45 GHz) arbeiten. Da das Feldverhalten natürlich nicht vergleichbar ist, sind nur wenige Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet vorhanden.

- **Sensorauswertung.** In den recherchierten Arbeiten werden lediglich diejenigen Sensorwerte verarbeitet, die die entsprechenden Sensoren liefern. Dies erscheint auf den ersten Blick nachvollziehbar, jedoch weisen die bislang erschienenen Arbeiten im UHF-Bereich eine Lücke auf, da bislang lediglich die Detektionsrate und der RSSI ausgewertet wurden. Die vorliegende Arbeit wird zeigen, dass dies bei Weitem nicht alle Möglichkeiten ausschöpft. So wird beispielsweise die Möglichkeit, bestimmte Speicherbereiche zu beschreiben, genutzt, um eine Relation zwischen Transponder und Reader-Antenne herzustellen.
- **Sensorfusion.** Die bekannten Ansätze fokussieren lediglich auf die Auswertung eines Sensorwertes. Es fehlt jegliche Nutzung der sonstigen (hier logistischen) Prozesse oder Zusammenhänge im Lokalisierungsraum. Das hat den Nachteil, dass im Falle einer Beeinträchtigung des Lösungssystems (z. B. Ausfall einer Antenne) die Lokalisierungslösung fehlerbehaftete Ergebnisse ausgibt. In der hier zu erarbeitenden Lösung werden mehrere Funktionen zur Lokalisierung beschrieben, die unabhängig voneinander arbeiten und einen Ausfall einer anderen Funktion kompensieren oder das Ergebnis durch ihre Funktion unterstützen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass alle sechs Dimensionen miteinander die Herausforderung dieser Arbeit bestimmen. In jeder der Dimensionen sind die derzeit vorhandenen Ansätze nicht ausreichend erforscht, um ein UHF-Lokalisierungssystem zu entwickeln, das in dem beschriebenen Lokalisierungsraum die geforderte Auflösung von kleiner 1 m erlaubt.

Nachfolgend wird der Forschungsansatz dieser Arbeit vorgestellt, der die aufgezeigten Herausforderungen angeht und das Lokalisierungsproblem durch ein neues Verfahren löst. Berücksichtigt man die Ergebnisse aus dem Stand der Wissenschaft und Technik, bietet sich im Bereich der Messverfahren eine Vielzahl an Ansätzen, die berücksichtigt werden können. Darüber hinaus sollen logistische Ereignisse und Regeln auf Eignung zur Lokalisierung geprüft werden, da solche Zusatzinformationen bislang zu wenig untersucht werden. Um die einzelnen Ergebnisse zu einem Lokalisierungsergebnis zusammenzuführen, soll ein Optimierungsverfahren genutzt werden. Der Forschungsansatz (siehe Abbildung 1.4) ist daher in drei konsequente Module aufgeteilt und findet sich als „Kernmodule“ in seiner Umsetzung im Modellentwurf (siehe Abbildung 1.1 auf Seite 5) der Arbeit. Diese drei Kernmodule werden im Laufe der Arbeit mehrmals unter unterschiedlichen Gesichtspunkten diskutiert und mit fortschreitendem Erkenntnisgewinn weiter detailliert. Dies bedeutet, dass auch erst nach dem Durchlaufen aller drei Module das Lokalisierungsergebnis vorliegt.

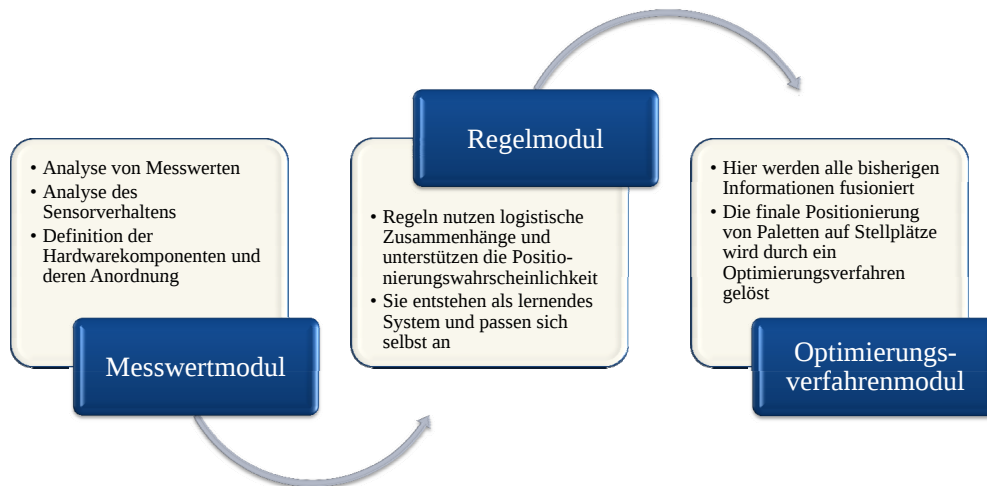


Abbildung 1.4.: Gliederung des Forschungsansatzes in drei Module

Das **Messwertmodul** beleuchtet alle Verfahren, die Messwerte nutzen, die der Reader ausgibt und zu einer Lokalisierung herangezogen werden können. Dazu werden unterschiedliche Reader auf ihre Eignung hin untersucht, in empirischen Versuchsreihen weitere RFID-Komponenten getestet, das Hardwarelayout bestimmt und Zusammenhänge zwischen Messwerten und einer Entfernung hergestellt. Die folgenden Fragen werden beantwortet.

- Welche Sensorwerte liefern die unterschiedlichen UHF-Reader?
- Welches Verhalten zeigen Sensorwerte bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen und Lokalisierungsobjekten?
- Welche Sensorwerte eignen sich für eine Lokalisierung?
- Unter Einsatz welcher Hardware (Antenne, Transponder) verhalten sich Sensorwerte stabil?
- Wie muss die Hardware in ihrer Geometrie aufgebaut sein, um eine optimale Ausleuchtung der Lokalisierungs Umgebung zu gewährleisten und valide Messwerte zu liefern?
- Lässt sich das Verhalten von Sensorwerten vorhersagen?

Die Aufgabe dieses Moduls ist es, diejenigen Messwerte zu finden, die eine Lokalisierung sicher ermöglichen. Dafür müssen Versuchsreihen belegen, auf welche Weise von Messwerten auf eine Position oder Entfernung geschlossen werden kann. Um dies festzustellen, werden die Ausprägungen mehrerer Sensorwerte unter sich verändernden Umweltbedingungen untersucht. Aus der Kenntnis über die UHF-Technologie und ihre elektromagnetischen Eigenschaften heraus ist bereits zu vermuten, dass das Messwertmodul keine absolute, sondern nur eine probabilistische Angabe (also eine Angabe auf Basis von Wahrscheinlichkeiten) für die Positionierung eines

Transponders auf Stellplätze machen kann. Wie der Abbildung 1.4 zu entnehmen ist, verarbeitet das zweite Modul, das Regelmodul, diese Werte weiter.

In einem klassischen Lokalisierungssystem basiert die Positionsbestimmung ausschließlich auf der Auswertung von Sensordaten. Dies ist jedoch nicht zwangsläufig notwendig, sofern auch andere, zusätzliche Informationen bekannt sind, die die Auflösung erhöhen. Aus diesem Grund sollen im **Regelmodul** bestimmte Zusammenhänge zwischen logistischen Prozessen und Stellplätzen zusätzlich zum ersten Modul (Messwertmodul) genutzt werden. Bei diesen Zusammenhängen handelt es sich um Informationen, die nicht zusätzlich generiert werden, sondern aus der Umgebung oder aus der Historie gewonnen werden. Folgende Fragen werden beantwortet.

- Welche Lagerkennzahlen können weitere Hinweise auf die Positionierung geben?
- Inwiefern können Historienwerte nutzbar gemacht werden?
- Können Bewegungen eines Gabelstaplers erfasst und verwendet werden?
- Wie lassen sich Erkenntnisse aus dem Regelmodul mit denen des Messwertmoduls kombinieren?
- Wie können Regeln so konstruiert werden, dass sie sich dynamisch an neue Umstände anpassen?

Aufgabe des Regelmoduls ist es, das Ergebnis für die Positionierung aus dem Messwertmodul heraus zu verbessern. Die dafür zu entwickelnden Regeln können die Wahrscheinlichkeit für eine solche Positionierung beeinflussen. Positionierungen, die durch das Regelmodul aus logistischer Sicht als unlogisch gelten, können durch den Einsatz des Regelmoduls niedriger gewichtet werden.

Nach Durchlaufen der beiden ersten Module kann es durchaus vorkommen, dass kein eindeutiges Ergebnis vorliegt. Dies ist immer dann der Fall, sobald die Wahrscheinlichkeiten für die Positionierung von zwei oder mehr Paletten auf einem Stellplatz gleich oder zumindest annähernd gleich sind. Folgerichtig muss im **Optimierungsverfahrenmodul** ein geeignetes Optimierungsverfahren die optimale Positionierung der Ladeeinheiten auf die Stellplätze vornehmen. Das Ziel der Nutzung des Optimierungsverfahrens und das Ergebnis des gesamten Verfahrens liegen also in der Ausgabe einer Liste mit optimierter Zuordnung von Ladeeinheiten auf Stellplätze. Folgende Fragen gilt es dafür zu beantworten.

- Welches Optimierungsverfahren eignet sich für das vorliegende Problem?
- Welches Optimierungsverfahren eignet sich bei einer steigenden Anzahl von Lokalisierungsobjekten?
- Wie kann die Darstellung des Optimierungsproblems erfolgen, um die Rechenzeit zu reduzieren, ohne die Ergebnisqualität zu verringern?

Aufgabe dieses Moduls ist die optimale Auflösung des Zuordnungsproblems. Dafür werden die zuvor erzeugten und im Regelmodul veränderten Wahrscheinlichkeiten für die Positionierung in einem Optimierungsverfahren neu bewertet.

Im Laufe der Arbeit werden diese Fragen in den drei Kernmodulen beantwortet. Für die Durchführung aller drei Module werden entsprechende Verfahren entwickelt. Deren Umsetzung wird in einer zu entwickelnden Lokalisierungssoftware übernommen. In mehreren Versuchsreihen wird die Güte der Lösung evaluiert, und die Erkenntnisse werden in das Gesamtmodell eingearbeitet.