

## **LotTrack: RFID-basierte Prozesskontrolle in der Halbleiter-Industrie**

*Frederic Thiesse*

*Markus Dierkes*

*Elgar Fleisch*

### **1 Einleitung**

Die Idee, Radio Frequency Identifikation (RFID), Infrarot- oder Ultraschall-Technologien bzw. Kombinationen dieser Technologien für die „Indoor“-Lokalisierung zu nutzen, existiert seit einiger Zeit [1]. Obwohl die Industrie und die Universitäten mittlerweile einen beträchtlichen Forschungsaufwand in diesem Bereich unternommen haben, sind kommerziell verfügbare System für die Lokalisierung und/ oder das *Tracking* von Objekten und Personen immer noch sehr selten. Ein Grund ist die grosse Anzahl an technischen Hindernissen in vielen Konzepten, wie z.B. die unzureichende Robustheit bei schwierigen Umgebungsbedingungen oder die limitierte Anzahl an Objekten, die gleichzeitig lokalisiert werden können. Ein weiterer Grund ist das Fehlen von betriebswirtschaftlich sinnvollen Applikationsszenarien, die die substanziellen Investitionen in eine Lokalisierungsinfrastruktur und in die Systemintegration rechtfertigen können [2]. Entgegen dieser Situationsdarstellung beschreibt dieser Artikel den Entwurf und die Implementierung eines Real-Time-Lokalisierungssystems, welches für Infineon Technologies entwickelt wurde. Das System kombiniert aktive, passive RFID- und Ultraschalltechnologie mit der Zielsetzung, aus Plastik bestehende Waferboxen und -kassetten in den Reinräumen der Halbleiterfertigung zu verfolgen.

Infineon Technologies ist einer der weltweit größten Halbleiterhersteller mit 36.000 Angestellten und einem Umsatz von 7,19 Milliarden € im Jahr 2004. Wie auch andere Unternehmen der Branche strebt auch Infineon nach einem höheren Automatisierungsgrad in der Produktionslogistik, um Lagerbestände zu senken und die Effizienz von Transportprozessen zu erhöhen. In der Praxis wird hierzu eine Reihe von hoch automatisierten Transportsystemen eingesetzt, deren Konzept vor allem auf die Bedürfnisse großer Chip-Fabriken („Fabs“) mit relativ statischen Prozessen, begrenzter Produktpalette und hochvolumiger Produktion ausgelegt ist. Im Gegensatz dazu sind jedoch Fabs mit stärkerer Kundenori-

entierung wegen der hohen Variantenvielfalt und der regelmäßigen Umbauten des Produktionssystems auf flexible, auf den einzelnen Mitarbeiter ausgerichtete Automatisierungstechnologien angewiesen.

Ein Beispiel für eine derartige Fab ist das Infineon Werk in Villach, Österreich. Villach ist die Zentrale von Infineons Automotive & Industrial Business Group. Die Einheit entwickelt und produziert vor allem Komponenten für den Einsatz in Autos, z.B. zur Motorsteuerung, Comfort & Safety Management und Infotainment. Das Werk arbeitet rund um die Uhr mit 2.000 Mitarbeitern und produziert ca. 800 verschiedene Produkte mit einem Gesamtvolumen von 10 Milliarden Chips pro Jahr. Aufgrund der enormen Vielzahl an Prozessen werden Produktionslose nicht mittels Fließbändern, sondern manuell von einer der 600 Maschinen zur anderen transportiert und durchlaufen so ca. 400 Produktionsschritte. Zu diesem Zweck werden die Siliziumwafer in sog. „Waferkassetten“ aufbewahrt, welche in speziellen Plastikboxen transportiert werden und jeweils bis zu 25 Wafer beinhalten.



Abbildung 1: Wafer – Kassetten und Los- bzw. Plastikboxen (Quelle: Entegris.)

Während in der Vergangenheit der einzelne Produktionsschritt in einer Maschine von der zentralen Fertigungssteuerung (MES) kontrolliert wurde, war der zwischen zwei Schritten liegende Transportprozess vollständig intransparent. Wie erste Analysen zeigten, hatte eine verbesserte Transparenz der innerbetrieblichen Logistik das Potenzial, Durchlaufzeiten zu senken und die Maschinenauslastung zu verbessern. Darüber hinaus konnte die korrekte Abarbeitung eines Produktionsprogramms an der jeweiligen Anlage nicht immer an

genau dieser Anlage garantiert werden, so dass auf ein weniger priorisiertes Los ausgewichen werden musste. Derartige Verfahrensweisen führten dazu, dass der Produktionsplan der Fertigung und die wirkliche Produktion unter bestimmten Umständen auseinanderlaufen, was dann zumeist zu zusätzlichen Anstrengungen und Aufwänden für die Einhaltung der Termintreue führt. Vor diesem Hintergrund entschied Infineon, die Fab mit einem Echtzeit-Lokalisierungssystem auszustatten, um den gesamten Produktionsprozess inkl. der Transport- und Liegeprozesse eines Loses sichtbar und damit kontrollierbar zu machen. Hauptziele des Projekts waren niedrigere Durchlaufzeiten sowie die vollständige Vermeidung von nicht wertschöpfenden Aktivitäten und Fehlern beim Transport. Daneben wurde das Projekt auch als ein Schritt in Richtung der papierlosen Fab betrachtet und damit zu einer weiteren Partikelreduktion im Reinraum.

## 2 Anforderungsanalyse

In der ersten Projektphase galt es, eine passende Identifikations- und Lokalisierungstechnologie auszuwählen. Die genaue Kenntnis der konkreten Anforderungen an die gewünschte Lösung war hierfür notwendig. Für die Verfolgung der Waferboxen unter Reinraumbedingungen waren besonders folgende Anforderungen und Restriktionen für den Systementwurf ausschlaggebend:

- Die gesamte Anzahl an Waferboxen, die gleichzeitig im Werk zu lokalisieren ist, sollte größer sein als 1000 Waferboxen.
- Die Dichte an Waferboxen ist an manchen Stellen, insbesondere in Regalen, sehr hoch, so dass mehr als 100 Waferboxen auf sechs Quadratmeter vom System ohne Problem zu identifizieren und zu lokalisieren sind.
- Um eine zeitnahe Prozesskontrolle zu ermöglichen, darf der Verzug zwischen den wirklichen Transporten einer Waferbox und der Meldung eines neuen Ereignisses oder einer neuen Position nicht länger als eine Minute dauern (Richtwert 30 Sekunden). Hierbei muss auch erkannt werden, ob sich die Waferbox in Ruhe oder in Bewegung befindet.
- Die Lokalisierungsgenauigkeit des Systems sollte mindestens einen Meter betragen, um für die Mitarbeiter eine möglichst genaue Losposition ausweisen zu können.
- Decke, Boden, Anlagen und Wände im Reinraum sind metallisch und verursachen elektromagnetische Reflektionen, die keine Störungen bei Lokalisierungs- oder Kommunikationsoperationen erzeugen dürfen.
- Eine direkte Sichtverbindung zwischen der Waferbox und den Lesegeräten bzw. Antenneninstallationen kann nicht immer garantiert werden. Unterschiedliche Positionen in der Regalen oder auf den Transportwagen sowie

die Orientierungen der Waferboxen dürfen keinen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems haben,

- Der Energieverbrauch der zu verfolgenden Transponder, die mit den Waferboxen integriert werden, sollte auf mindestens 2 Jahre ausgelegt werden.
- Im Falle eines kritischen Systemfehlers darf ein einfacher System-Shutdown inkl. einer Wiederherstellung der Systemverfügbarkeit nicht länger als 5 Minuten dauern, da sich andere Systeme auf die Informationen und die Verfügbarkeit des Lokalisierungssystems verlassen müssen.

Zudem ist während der Phase der Anforderungsanalyse entschieden worden, daß das System in der Lage sein muss, die Informationen des Planungs- und Steuerungssystems bzw. des geführten Arbeitsplans direkt dem Mitarbeiter mitzuteilen bzw. diese umgehend an der Waferbox anzuzeigen. Damit wird der traditionell papier-basierte Arbeitsplan komplett durch Textnachrichten und weitere Anzeigemöglichkeiten in Form eines elektronischen Displays an der Waferbox ersetzt. Die für die Zustellung dieser Arbeitsplaninformationen erlaubte Systemzeit darf nicht länger als 1,5 Sekunden betragen und muss jederzeit parallel zu den Lokalisierungsfunktionen möglich sein.

Die Lokalisierung der Waferboxen zielt primär auf eine Minimierung der Such- und Durchlaufzeiten ab. Für die Reduktion von Prozessierungsfehlern ist zusätzlich eine eindeutige Identifikation der einzelnen Waferkassetten, die in den Waferboxen getragen werden, erforderlich. Hierfür bedarf es einer passiven Identifikationslösung, um die Kassetten an den einzelnen Anlagen der Fertigung zu berechnen. Fehlprozessierungen, die u.U. zu teurem Ausschuss führen, können dadurch vermieden werden.

### 3 Bisherige Arbeiten

Das Thema Lokalisierung wird üblicherweise mit dem Global Positioning System (GPS) assoziiert, welches eine Genauigkeit von maximal ca. 3 Meter erlaubt. Leider kann dieser „Klassiker“ unter den Lokalisierungstechnologien nicht innerhalb von Gebäuden realisiert werden, da der Empfang der GPS-Satellitensignale durch die Wände eines Gebäudes zu schwach ist [3]. In diesem Zusammenhang ist die Unterscheidung von Positionierungs- und **Tracking-Technologien** maßgeblich. Wie der Name schon sagt, wurde LotTrack als Tracking-Technologie realisiert, bei der die Objekte von einer zentralen Stelle aus betrachtet werden. Hingegen ist es bei den Positionierungsapplikationen das jeweilige physische Objekt, dessen eigene Position ermittelt wird [10].

Beide Ansätze werden bei der „Indoor“-Lokalisierung durch Infrarot-, Ultraschall- oder RFID-Technologien wie folgt unterstützt:

- Das “Active Badge Location System [4]” ist ein Beispiel einer auf Infrarot-Technologie basierenden Lösung. Dieses System wurde ursprünglich für die Lokalisierung von Personen in Bürogebäuden entwickelt. Hierbei trägt eine Person einen „Badge“, der alle 10 Sekunden ein eindeutiges Infrarotsignal aussendet. Mehrere Sensoren an der Decke, deren Position bekannt ist, empfangen diese Signale und leiten die Information an eine zentrale Lokalisierungs-komponente weiter. Die Notwendigkeit einer direkten Sichtverbindung, die so genannte „line-of-sight“-Bedingung, und die kurze Signalreichweite sind zwei limitierende Faktoren dieses Konzeptes.
- Cricket [5] ist ein auf Ultraschall-Technologie basierendes Positionierungssystem, welches als **Sendegerät ein so genanntes „Beacon“** verwendet, das gleichzeitig zum Funksignal auch ein Ultraschallsignal aussendet. Beide Signale werden von einem Empfangsgerät detektiert, welches zumeist mit einem anderen mobilen Gerät (wie z.B. einen Laptop oder einem Handheld) verbunden ist. Aus der Zeitdifferenz beider Signale lässt sich sehr exakt der Abstand der Position zum Sender ermitteln. Das “Active Bat-System [6]” basiert auf einem ähnlichen Ansatz, jedoch wurde hier das Prinzip umgedreht, so dass die Sender mobil und die Empfänger als Empfangsgeräte an der Decke installiert wurden.
- Aktive RFID-Transponder, deren Signalstärken von Lesegeräten empfangen werden, werden bei LANDMARC [7] verwendet. Die mit RFID versehenen Objekte werden von den Lesegeräten erfasst und deren Informationen an einen zentralen Lokalisierungsalgorithmus weitergeleitet. Zusätzlich werden feste, stationäre Referenztransponder zur Erhöhung der Lokalisierungs-genauigkeit eingesetzt. Andere auf Funk basierende Systeme lokalisieren entweder auf der Grundlage von Feldstärkeninformationen (z.B. Wireless LAN), **in Form eines RADAR-Systems [8]** oder auf der Basis einer Laufzeitberechnung wie z.B. die Ultrawideband (UWB)-Technologie [9].

Jede der oben dargestellten Technologien hat ihre eigenen Stärken und Schwächen bzgl. der Lokalisierungsgenauigkeit, Anwendungsbreite des Einsatzes oder Kosten etc.

Im LotTrack-Projekt wurde eine rein passive Transponderlösung aufgrund der limitierten Lesereichweite dieser Technologien verworfen. Eine aktive RFID-Infrastruktur alleine arbeitet aufgrund des hohen Metallanteils in den Reinräumen für die Realisierung einer robusten Lokalisierungsfunktionalität auch nicht hinreichend stabil: Die gute Reichweite und Kommunikationsperformance der aktiven Technologien genügt auf der einen Seite den Anforderungen, verursacht

jedoch aufgrund der sich durch Reflexionen überlagernden Signale sehr volatile Lokalisierungsergebnisse. Infrarot als Trägertechnologie wurde ebenfalls aufgrund der hohen Anforderung an die Gewährleistung der „line-of-sight“-Bedingung verworfen. Zudem hätten Positionsveränderungen der Regale bei einer Ausstattung mit Infrarot-Technologie zu aufwändigen Anpassungen der Lokalisierungsinfrastruktur bzw. der installierten Infrarot-Sender geführt. Mit Ultraschall ist eine sehr genaue Abstandmessung möglich, jedoch sind rein darauf basierende Lokalisierungssysteme hinsichtlich der Anzahl an gleichzeitig zu lokalisierenden Objekten stark limitiert. Ein System wie „Active Bat“ funktioniert bei einer großen Anzahl von zu lokalisierenden Objekten nicht besonders gut, da zu viele Ultraschallsignale gleichzeitig vom selben Sender empfangen und unterschieden werden müssen.

#### **4 LotTrack-Lokalisierungskonzept**

Im Projekt wurde deutlich, dass der Trade-Off zwischen einer hohen Lokalisierungsgenauigkeit, einer hohen Kommunikationsrate und einer großen Anzahl an Objekten im System nur durch eine Kombination der Stärken von Funk- und Ultraschalltechnologien realisiert werden konnte. Die aktive RFID-Technologie wurde als Basistechnologie ausgewählt, da sie hinsichtlich Kommunikationsperformance und Energieverbrauch vorteilhaft war. Jedoch zeigten die ersten Tests, dass eine Lokalisierung nur auf der Grundlage der Feldstärkenmessung keine stabile Lösung war, da die Reflexionen einen zu negativen Einfluss auf das Messergebnis besaßen. Aus diesem Grund wurde zur genaueren Lokalisierung Ultraschall verwendet. Ultraschallsender an der Decke emittieren periodisch Signale, die von den aktiven RFID-Transpondern (den so genannten DisTags) – ausgestattet mit einem Ultraschallempfänger – detektiert werden. Diese Transponder kalkulieren anschließend die Laufzeiten der Ultraschallsignale und legen diese in ihren Speichern ab. Die RFID-Controller lesen die Daten dieser Transponder aus und übertragen die Informationen zusammen mit der Feldstärkenmessung an einen zentralen Server, der mittels eines ausgefeilten Algorithmus die Positionen aller Objekte ermittelt. Das gesamte System ist voll synchronisiert. Zu diesem Zweck senden die Controller an der Decke zyklisch Synchronisationssignale an die Transponder, um sicherzustellen, dass alle Systemkomponenten mit derselben absoluten Zeit agieren.

Die Lokalisierungsprozedur basiert dabei auf einem 10 Sekundenzyklus, der in drei Phasen unterteilt ist:

- In der ersten Phase hören die Transponder bzw. DisTags auf ein vordefiniertes Muster an Ultraschallsignalen der Ultraschall-Sendern, die in der Anten-

neninstallation an der Decke des Reinraumes integriert wurden. Aufgrund der Synchronität des Systems können die DisTags die Laufzeiten der Signale messen und ihre Entfernung vom den US-Sendern berechnen.

- In der zweiten Phase werden im RFID-Protokoll die gespeicherten Daten der Transponder im Umfeld der RFID-Antennen ausgelesen und so die Informationen der Abstandmessungen eingesammelt.
- Die dritte Phase in diesem Zyklus ist für beliebige Kommunikationsoperationen zwischen dem Controller und den DisTags reserviert und wird bei Bedarf genutzt.

In diesem Lösungskonzept erfüllt die RFID-Technologie drei Ziele: Erstens liefert sie das RFID-Protokoll zur Identifikation einer großen Anzahl an Transpondern. Zweitens werden durch die Messung der Feldstärke die Ergebnisse der auf Ultraschall basierenden Abstandsmessung mit einem zusätzlichen Plausibilitätscheck versehen. Und schließlich dient das RFID-Protokoll sowohl dem Auslesen der in den DisTags gespeicherten Abstandsinformationen als auch den Kommunikationsoperationen.

Um die Anzahl an Ultraschallsendern zu minimieren und das Lokalisierungsprinzip zu vereinfachen, wurde eine Bilateration entlang der Linie als hinreichend für die Lokalisierung von Objekten im Reinraum erachtet, da es sich hierbei eher um Gänge zwischen den Fertigungsanlagen als um grosse Räume handelt. Ausserdem ermöglicht eine Lokalisierung entlang von Gängen für den Mitarbeiter eine schnellere Orientierung als die Angabe von beliebigen dreidimensionalen Koordinaten.

Der resultierende Algorithmus arbeitet dabei wie folgt:

1. Die gemessenen Abstände definieren einen Kreis um die jeweiligen Ultraschallsender. Im ersten Schritt kalkuliert der Algorithmus die Schnittpunkte  $p_j$  aller möglichen Kombinationen von Kreisen bzw. gemessenen Abständen der jeweiligen Ultraschallsender. Im Beispiel in Abbildung 2 werden sechs verschiedene Schnittpunkte in der Ebene auf der Basis von vier Kreisen bzw. vier Abstandsmessungen erzeugt.
2. In einem zweiten Schritt werden durch Plausibilitätsprüfungen falsche bzw. unmögliche Positionen eliminiert. In dem Beispiel wird  $p_4$  eliminiert, weil diese Position außerhalb des gültigen Layoutbereiches bzw. hinter der Reinraumwand liegt.
3. Nachfolgend kalkuliert LotTrack den Durchschnittswert aller gültigen Positionen und eliminiert diejenigen mit dem größten Abstand von diesem Mittelwert bis zu einem einstellbaren Grenzwert. Die verbleibende Position wird dabei als aktuelle Position des Objektes angesehen. In dem Beispiel wird nur  $p_1$  ausgewählt, da sich hier alle Kreise schneiden.

4. Abschließend wird die Position auf die Mittelachse der benachbarten Gänge projiziert. Hierdurch wird eine zweidimensionale Position in mehrere eindimensionale Orte  $l_k$  übersetzt. In dem Beispiel wird  $l_A$  als Position der Mittellinie des Korridors A und  $l_B$  als Position der Mittellinie des Korridors B bestimmt. Da die Position  $l_B$  nicht innerhalb der logische konfigurierten Grenzen des Korridors B liegt, fixiert LotTrack die Position  $l_A$  als das Endergebnis des Algorithmus.

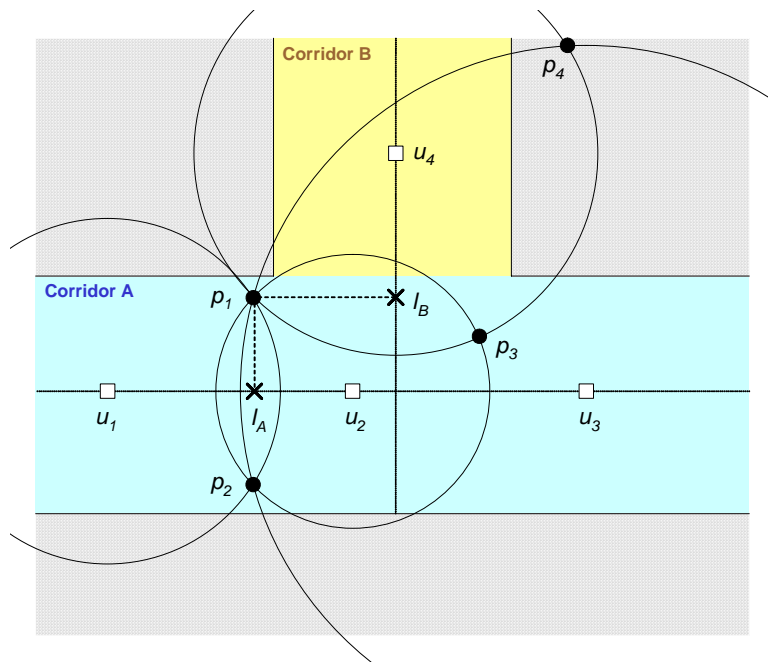


Abbildung 2: Kalkulation der Losbox-Positionen

## 5 Systemkonzept

Infineons Partner in dem Projekt war der Schweizer Lösungsanbieter Intellion. Intellion war als Generalunternehmer für Projektmanagement, Systementwurf, Entwicklung und Installation des Systems verantwortlich; Identec Solutions lieferte seine Aktiv-RFID-Technologie „Intelligent Long Range“ (ILR) als Grundlage für die LotTrack-spezifischen Lokalisierungstransponder. ILR-Transponder arbeiten im UHF-Frequenzband und erreichen eine maximale Lesereichweite von 100 Metern. Zusätzliche Features des für LotTrack entwickelten „DisTag“ sind ein Ultraschallsensor, eine zweifarbige LED, ein mecha-

nischer Flipdot (Schwarz-Gelb-Anzeige), ein Strom sparendes No-Power-Display und vier Tasten für Benutzerinteraktion (siehe Abbildung 3). Der DisTag ist somit nicht nur eine Komponente zur Lokalisierung, sondern auch die Schnittstelle zum Mitarbeiter im Reinraum. Das Display ersetzt die traditionellen Papierchecklisten und liefert Informationen zur Losidentifikationsnummer und den folgenden Produktionsschritten. Der trotz der zahlreichen Zusatzfeatures niedrige Energieverbrauch des DisTags erlaubt eine Lebensdauer von mehr als zwei Jahren.



Abbildung 3: Bestandteile des DisTags

Die zweite Systemkomponente ist das Lesegerät. Hierbei wurde ein RFID-Controller, an den bis zu vier RF-Antennen angeschlossen werden können, um zusätzliche Anschlüsse für Ultraschallsender erweitert. Um die Installationsarbeiten im Reinraum auf ein Minimum zu reduzieren, wurden je eine RF-Antenne und drei Ultraschallsender in einem standardisierten Antennenmodul

mit vorkonfigurierter Verkabelung zusammengefasst, welches vergleichsweise einfach an der Decke installiert werden kann. Der Abstand zwischen den Sendern wurde dabei so gewählt, dass ein DisTag stets eine für die Bilateralation ausreichende Zahl von Ultraschallsignalen von unterschiedlichen Sendern erhält.

Das gesamte System wird von einem zentralen Server kontrolliert, der Netzwerkverbindungen zu jedem Lesegerät aufrecht erhält (siehe Abbildung 4). Der Server empfängt die gesammelten Daten von den Lesegeräten, welche als Grundlage für die Positionsberechnung dienen. Er ist darüber hinaus auch für Plausibilitätsprüfungen und weitere Filtermechanismen verantwortlich, die eine möglichst hohe Datenqualität garantieren sollen. Die Ergebnisse werden an eine Messaging-Middleware übergeben, die diese wiederum an diverse Client-Systeme weiterleitet. Die Middleware dient darüber hinaus auch zur Übermittlung von Kommandos dieser Clients an LotTrack, z.B. im Fall von Schreib-/Leseoperationen auf einzelnen DisTags. Neben der Fertigungssteuerung werden Positionsdaten auch von einem Visualisierungstool ("FabViewer") verarbeitet, welches einen grafischen Überblick über die Prozesse im Werk liefert. Darüber hinaus zeichnet LotTrack eine Vielzahl von Performance-Indikatoren auf, die zur Administration des Systems genutzt werden können.

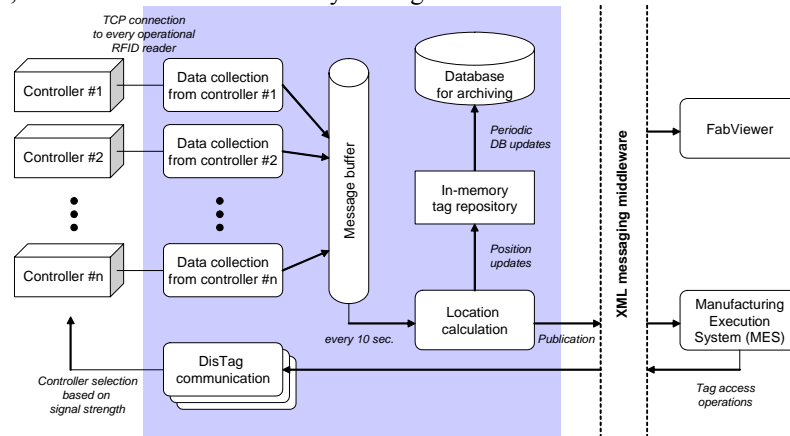


Abbildung 4: System-Architektur LotTrack

### Benutzerfunktionalität

Wahrfertigungsprozesse werden üblicherweise über sog. „Dispatch-Listen“ gesteuert, die die Reihenfolge der Losbearbeitung an einer Maschine bzw. Maschinengruppe festlegen. Mitarbeiter im Reinraum können dabei direkt am Bild-

schirm dasjenige Los auswählen, welches sie als nächstes bearbeiten wollen. Die Tatsache, dass ein Los zur Bearbeitung reserviert wurde, wird durch einen aktivierten Flipdot auf dem DisTag angezeigt. LotTrack liefert Informationen zu dessen Position. Für die schnelle Identifikation in der Nähe des DisTags bzw. des Loses kann jeder Mitarbeiter die DisTag-LED blinken lassen, so dass die Box leicht identifiziert und einem Regal entnommen werden kann. Des Weiteren registriert das System, ob sich eine Box in Ruhe oder in Bewegung befindet, so dass der Mitarbeiter entscheiden kann, ob er auf das Los warten will oder sich aktiv auf die Suche begibt.

Der Mitarbeiter nimmt die Box und bringt sie zu einer Maschine. Die Information auf dem Display zeigt ihm, welche Maschine an welchem Ort das Ziel des Transportes ist und was der nächste Arbeitsschritt ist. Er öffnet die Box, stellt die Waferkassette in die Maschine und startet den Bearbeitungsschritt. Ist die Bearbeitung beendet, nimmt der Mitarbeiter die Kassette aus der Maschine und stellt sie zurück in die Box. Das Manufacturing Execution System (MES) ermittelt den nächsten Arbeitsschritt und den nächsten Ort des Loses und aktualisiert über das LotTrack – System per Funk das DisTag-Display. Anschließend oder parallel dazu stellt der Mitarbeiter die Box in ein Regal, von wo aus sie zur nächsten Maschine transportiert wird.

#### **Bisherige Erfahrungen**

Die Installation in Villach umfasst ca. 100 Lesegeräte und über 1.000 DisTags. Das System verarbeitet ca. 3 Milliarden Ultraschallmessungen der DisTags am Tag, aus denen 270 Millionen Positionen mit einer Lokalisierungsgenauigkeit von +/- 30 cm errechnet werden. Da LotTrack Positionsänderungen erst bei Überschreitung eines frei einstellbaren Schwellwerts publiziert, werden letztlich 500.000 Positionsaktualisierungen an die Client-Systeme weitergeleitet. Die zeitliche Verzögerung zwischen physischem Prozess und Veränderung im System inkl. der Entscheidung, ob der DisTag in Bewegung ist oder nicht, beträgt ca. 30 Sekunden.

LotTrack ist mittlerweile seit fast zwei Jahren in Betrieb und hat sich als äußerst robust und effizient bei der Lokalisierung und Kommunikation mit einer großen Anzahl von Objekten erwiesen. Die Nutzeneffekte für die Fertigung sind eine geringere Anzahl an Prozessfehlern sowie insbesondere kürzere Durchlaufzeiten oder eine bessere Auslastung der Fertigung. Nicht zuletzt ist LotTrack auch ein wichtiges Element der papierlosen Fab, in der der DisTag alle notwendigen Informationen zu einem Los anzeigt und so die Kommunikation mit den Mitarbeitern vereinfacht und flexibilisiert.

### 5.1 Literatur

1. J. Hightower, G. Borriello: Location Systems for Ubiquitous Computing. *IEEE Computer*, vol. 34, no. 8, August 2001, pp. 57-66
2. M. Hazas, J. Scott, J. Krumm: Location-Aware Computing Comes of Age. *IEEE Computer*, vol. 37, no. 2, February 2004, pp. 95-97
3. G. Borriello, M. Chalmers, A. LaMarca, P. Nixon: Delivering Real-World Ubiquitous Location Systems. *Communications of the ACM*, vol. 48, no. 3, March 2005, pp. 36-41
4. R. Want, A. Hopper, V. Falcao, J. Gibbons: The active badge location system. *ACM Transactions on Information Systems*, vol. 10, no. 1, January 1992, pp. 91-102
5. A. Smith, H. Balakrishnan, M. Goraczko, N. Priyantha: Tracking moving devices with the cricket location system. *Proc. of the 2<sup>nd</sup> international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys 2004)*, ACM Press, New York, 2004, pp. 190-202
6. M. Addlesee, R. Curwen, S. Hodges, J. Newman, P. Steggles, A. Ward, A. Hopper: Implementing a Sentient Computing System. *IEEE Computer*, vol. 34, no. 8, August 2001, pp. 50-56
7. L.M. Ni, Y. Liu, Y.C. Lau, A.P. Patil: LANDMARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID. *Wireless Networks*, vol. 10, no. 1, January 2004, pp. 701-710
8. P. Bahl, V.N. Padmanabhan: RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System. *Proc. of the IEEE Infocom 2000*, IEEE CS Press, Los Alamitos (CA), 2002, pp. 775-784.
9. R.J. Fontana, S.J. Gunderson: Ultra-wideband precision asset location system. *Proc. of the IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies (UWBST 2002)*, IEEE CS Press, Los Alamitos (CA), 2002, pp. 147-150
10. S. Helal, B. Winkler, C. Lee, Y. Kaddourah, L. Ran, C. Giraldo, W. Mann: Enabling Location-Aware Pervasive Computing Applications for the Elderly. *Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom'03)*, Fort Worth (TX), 2003, pp. 531-538
11. J. Indulska, P. Sutton: Location Management in Pervasive Systems. *Proceedings of the Australasian information security workshop conference on ACSW frontiers*, vol. 21, Adelaide, 2003, pp. 143-151