

Evaluierung von Indoor-Positioning Systems anhand EN ISO 9283 in der *SmartFactory*^{KL}

Eine Technologieanalyse unter realitätsnahen Einsatzbedingungen

Dipl.-Ing. Peter Stephan, DFKI GmbH, Kaiserslautern

Ines Heck, TU Kaiserslautern, Kaiserslautern

Dipl.-Ing. Peter Kraus, TU Kaiserslautern, Kaiserslautern

Prof. Dr.-Ing. Georg Frey, DFKI GmbH, Kaiserslautern

Kurzfassung

Der vorliegende Beitrag präsentiert einen neuen Ansatz, zur Evaluierung von Systemen zur Positionsbestimmung im Innenraum (Indoor-Positioning Systems IPS). Basierend auf Definitionen der EN ISO 9283 wird eine präzise mathematische Definition der für die Positionsbestimmung zentralen Kenngrößen *Genauigkeit* und *Präzision* gegeben. Anhand des entwickelten Vorgehens wurde in der *SmartFactory*^{KL} die Performanz zweier IPS (basierend auf Ultraschall-Technologie bzw. auf Ultra-Wide-Band-Technologie) hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für den Einsatz in Produktionsumgebungen evaluiert. Entsprechende Testreihen wurden sowohl unter optimalen als auch unter realitätsnahen Einsatzbedingungen, wie sie in Produktionsumgebungen herrschen, durchgeführt. Aufgrund der hohen Varianz der mittels beider IPS erzielten Resultate erfolgt im Rahmen der Ergebnisauswertung eine ausführliche Diskussion und Fehlerbetrachtung. Darüber hinaus werden verschiedene weiterführende Forschungsmöglichkeiten im Bereich der Ortungstechnologien aufgezeigt.

Evaluation of Indoor-Positioning-Systems based on ISO 9283 in the *SmartFactory*^{KL}

In order to evaluate indoor positioning technologies according to industrial standards, this paper presents a new mathematical approach based upon EN ISO 9283 giving a precise definition of positioning *accuracy* and *precision*. Following this approach, two indoor positioning systems (IPS) applying ultra wide band (UWB) and ultrasound technology have been tested in the *SmartFactory*^{KL} to get a better understanding of their suitability for industrial location-based services (LBS). Testing has been conducted under optimal operating conditions and under realistic shop-floor conditions as well. Since both technologies show highly variable performance, measurement results are discussed in detail and recommendations for further research in the field of location technologies are given.

1. Einleitung

Nachdem mit ortsbezogenen Diensten (Location-based Services, LBS) im Bereich des mobilen Kommunikationsmarktes erste erfolgreiche Anwendungen und Geschäftsmodelle realisiert wurden, stößt die nutzbringende Anwendung von Ortsinformationen auch auf zunehmendes Interesse in der produzierenden Industrie. Mit der Entwicklung und wachsenden Verbreitung von Systemen zur Positionsbestimmung im Innenraum (Indoor-Positioning-Systems, IPS), eröffnet sich eine ganze Reihe neuer Möglichkeiten zur Optimierung und Neugestaltung von Prozessen und Abläufen. Einen ersten Eindruck von diesen Möglichkeiten vermitteln visionäre Szenarien aus den Bereichen der mobilen Wartung oder der Parametrierung industrieller Feldgeräte durch mobile Bediengeräte [1], in die eine Integration von Ortsinformationen sehr gut vorstellbar ist.

Da LBS in erste Linie auf präzisen und verlässlichen Ortsinformationen beruhen, bilden IPS als Quelle solcher Daten den zentralen Kern aller Anwendungen dieser Klasse. Für die Qualität der Ortsinformationen sind insbesondere die Kenngrößen *Genauigkeit* und *Präzision* vor anderen Kriterien wie Skalierbarkeit, Robustheit, Energieverbrauch oder Lebenszykluskosten ein Maß für die Leistungsfähigkeit von IPS. Da Ortsinformationen im industriellen Umfeld möglicherweise als Basis zur Steuerung und Kontrolle erfolgskritischer Prozesse dienen, müssen IPS darüber hinaus ein in hohem Maße vorhersagbares Systemverhalten sowie höchste Zuverlässigkeit im Betrieb aufweisen.

Diesen sehr hohen Anforderungen stehen raue Einsatzbedingungen in klassischen Produktionsumgebungen gegenüber. Die Mischung aus Materialien wie Beton, Stahl und Glas sowie die Allgegenwärtigkeit von Schmutz und Staub in Kombination mit Quellen für unterschiedlichste Störungen (Ultraschallquellen, Quellen für infrarote Strahlung, etc.) lassen vermuten, dass die Funktion von IPS eine Beeinträchtigung erfährt. Darüber hinaus führt die steigende Verwendung von drahtlosen Kommunikationsnetzen in modernen Fabrikumgebungen zu einer steigenden Auslastung insbesondere der unlicenzierten Frequenzbänder. Folglich ist die präzise Bestimmung von Positionen und Aufenthaltsorten in heutigen Produktionsumgebungen eine nicht trivial zu lösende Aufgabe.

Derzeit werden IPS unterschiedlichster Ausprägung und Architektur erforscht. Hierbei konzentrieren sich aktuelle Bemühungen auf die Entwicklung neuer Systeme [2, 3] sowie auf den Entwurf beispielhafter Applikationen [4, 5]. In beiden Fällen spielt jedoch die zuverlässige Bewertung der Qualität von Ortsinformationen, in erster Linie repräsentiert durch die Kenngrößen *Genauigkeit* und *Präzision* eine zentrale Rolle. Nichtsdestotrotz lassen derzeitige Ansätze eine klare und mathematisch präzise Definition dieser Kenngrößen sowie eine Anweisung wie diese zu berechnen sind vermissen [6].

Darüber hinaus wurde bisher die Mehrzahl der Evaluierungen von IPS in Büro-Umgebungen [7] oder Lagerhäusern [4] durchgeführt. Nur in Ausnahmefällen [8] wurde die Funktionsfähigkeit von IPS unter anspruchsvolleren, industriellen Anwendungskontexten untersucht.

Um eine realistisch Einschätzung davon zu erhalten, in wie weit IPS auf dem derzeitigen Stand der Technik in der Lage sind als Basis für die Konzeption und Umsetzung von LBS in industriellen Umgebungen zu dienen, müssen somit zwei Voraussetzungen erfüllt werden. Zum einen besteht die Notwendigkeit der Definition einer standardisierten und mathematisch exakt beschriebenen Evaluationsmethode. Zum anderen müssen entsprechende Systemuntersuchungen in realitätsnahen Produktionsumgebungen durchgeführt werden.

Hierzu wird in vorliegendem Beitrag ein neuer mathematischer Ansatz vorgestellt und im Rahmen einer Fallstudie in der *SmartFactory*^{KL} angewendet. Diskutiert werden Messergebnisse von IPS basierend auf Ultraschall- und Ultra-Wide-Band-Technologie (UWB).

2. Evaluerte Technologien

2.1 Ultraschall-Technologie

Die Ultraschall-Technologie findet ihre Anwendung in IPS, da sie eine vergleichsweise exakte Bestimmung von Ortskoordinaten ermöglicht. Aufgrund der geringen Signalgeschwindigkeit (ca. 343 m/sec bei 20° C und 1105 pa Luftdruck) können Laufzeitunterschiede präzise in Entfernungen aufgelöst werden. Da hochsensitive Ultraschall-Sensorik die Voraussetzung für eine präzise Messung darstellt, ist diese Technologie aber auch anfällig für Störquellen. So kann z.B. fertigungsprozessbedingter Ultraschall-Lärm, das Einschalten von Beleuchtung oder das Schlagen einer Tür zu einer fehlerhafteten Positionsbestimmung führen [9].

Ein prominenter Vertreter dieser Technologie ist das MIT Cricket Indoor Location System [10] (vertrieben durch CROSSBOW TECHNOLOGY INC.). Das System ist einfach in Betrieb zu nehmen und beinhaltet eine offene Programmier-Bibliothek. Die als Hardware-Plattform dienenden MCS410CA Motes können als aktive Beacons oder als passive Listener konfiguriert werden. Die Bestimmung der Entfernung zwischen Listener und einzelnen Beacons erfolgt über die „time-difference-of-arrival“-Methode (TDOA) wobei der Zeitunterschied zwischen der Ankunft eines Radio-Signals (433MHz) und eines gleichzeitig emittierten Ultraschall-Impulses (40kHz) detektiert wird. Über ein Kalman-Filter werden sequenziell emittierte Signale mindestens dreier Beacons in die resultierende Listener-Position umgerechnet. Die Kommunikation zwischen den Beacons ist dabei dezentral, vergleichbar mit CSMA/CA, aufgebaut [11]. Ausgehend von Messungen [10] kann angenommen werden, dass Fehler bei der Positionsbestimmung mit dieser Technologie in der Regel unter 0,15 m liegen.

2.2 Ultra-Wide-Band-Technologie

UWB beschreibt eine Radiofrequenz-Technologie, die sich über einen sehr weiten Bereich (3,1 bis 10,6 GHz) im unlicenzierten Frequenzband erstreckt. Durch das emittieren sehr kurzer Impulse über eine solche Bandbreite wird eine große Unempfindlichkeit gegenüber sog. Multipath-Effekten, wie sie speziell in Innenräumen häufig auftreten, erreicht. Darüber hinaus beinhaltet das Senden diskreter Impulse einer zeitlichen Länge von ca. 1ns eine inhärente Präzision für die „time-of-arrival“-Methode (TOA) und die „time-difference-of-arrival“-Methode (TDOA), da die aufgelöste Länge des Impulses nur ca. 0,3 m entspricht.

Obwohl es derzeit noch einige Probleme beim Einsatz von UWB-Technologie bezüglich der Interferenz mit anderen Frequenzen im unlicenzierten Band gibt, wird erwartet, dass UWB einen signifikanten Einfluss auf zukünftige Entwicklungen im Bereich der lokalen Datenübertragung und der Ortungstechnologien haben wird [9], wodurch auch das schnelle Wachstum bei UWB-basierten Systemen auf dem Markt für IPS zu erklären ist [12].

Als einer der Marktführer auf diesem Gebiet, bietet UBISENSE LIMITED eine IPS-Lösung zur Installation und Inbetriebnahme „out-of-the-box“ an. Neben der Systemhardware bestehend aus Ubisensoren und aktiven Ubitags steht eine umfangreiche und gut dokumentierte Software-Plattform zur Verfügung. Zur Positionsbestimmung emittieren die Tags kurze Impulse im Frequenzbereich zwischen 6 und 8 GHz. Zusätzlich erfolgt ein bidirektionaler Datenaustausch im 2,4 GHz Band. Die Auflösung der Ortsinformation erfolgt über die „angle-of-arrival“-Methode (AOA), die TDOA-Methode oder einer Kombination aus beiden. Ubisense gibt an, Objekte mit einer Genauigkeit von 0,15 m in 95% aller Fälle orten zu können [13].

3. Evaluierungsansatz

3.1 Derzeit verbreiteter Ansatz

Hinsichtlich der Evaluierung von IPS existieren derzeit verschiedene Definitionen der wichtigen Kenngrößen *Präzision* und *Genauigkeit*. Eine der in der Literatur am häufigsten herangezogenen Definitionen ist die von Hightower und Boriello [6]. In ihrem Papier wird *Genauigkeit* (Bezeichnet als *accuracy*) als „Korngröße“ definiert (z.B. „innerhalb von 10m“) innerhalb derer ein IPS in der Lage ist, eine Position zu bestimmen. Weiterhin wird *Präzision* (Bezeichnet als *precision*) mit dem Prozentsatz bezeichnet, mit der die vorab bestimmte *Genauigkeit* von erwartet werden kann (z.B. bei 95% aller ermittelten Werte). Dies impliziert, dass mit *Genauigkeit* ein kombiniertes Maß gegeben ist, welches den Durchmesser einer Punktwolke beschreibt, basierend auf dem Mittelwert und der Varianz der Distanzen zwischen einzeln gemessenen Punkten und dem zugehörigen Referenzpunkt. In diesem Zusammenhang ist *Präzision* ein Maß, welches die Varianz bezüglich der Distanzen zwischen gemessenen

Punkten und dem Referenzpunkt beschreibt. Folglich wird der Wert für die *Genauigkeit* direkt durch den Wert für die *Präzision* beeinflusst, da der Prozentsatz von Messwerten, der sich innerhalb eines bestimmten Umkreises befinden soll, direkt dessen Radius beeinflusst (steigende *Präzision* resultiert in niedrigerer *Genauigkeit*).

Eine mathematische Interpretation dieser verbalen Definitionen könnte beginnen mit der Beschreibung des gaußschen Mittelwerts für die ermittelten Distanzen \bar{d} und dessen Varianz S :

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad \text{und} \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}}$$

Hierbei ist d_i die euklidische Distanz zwischen den gemessenen Punkten $P_i(x_i, y_i, z_i)$; $i=1 \dots n$ und dem Referenzpunkt $O_{ref}(x_{ref}, y_{ref}, z_{ref})$:

$$d_i = \|P_i O_{ref}\| = \sqrt{(x_i - x_{ref})^2 + (y_i - y_{ref})^2 + (z_i - z_{ref})^2}$$

Basierend auf diesen Vordefinitionen folgt die *Genauigkeit A* zu:

$$A = \bar{d} + 2S$$

mit dem Faktor 2 als Indikator dafür, dass es sich hierbei um ein Vertrauensintervall von 95% handelt (ein Faktor 3 würde ein entsprechendes Vertrauensintervall von 99% indizieren).

Folgend der oben gegebenen Definition, beschreibt die *Präzision P* die Prozentzahl der Messwerte, die in diesen Vertrauensbereich fallen (also 95% beim obigen Faktor 2).

Die Schwäche dieses Ansatzes liegt darin, dass die hier verwendeten Definitionen von *Genauigkeit* und *Präzision* nur die Betrachtung eines vergleichsweise einfachen Fehlermodells erlauben, welches keine Unterscheidung zwischen systematischen und zufälligen Fehlern erlaubt. Dadurch ist es nicht möglich, Rückschlüsse auf die Verteilung gemessener Werte innerhalb einer Punktwolke zu ziehen und somit einen Hinweis darüber zu bekommen, ob beispielsweise eine falsche Systemkalibrierung oder aktuell vorhandene Hintergrundstörungen für die schwache Performanz eines IPS verantwortlich sind.

3.1 Evaluationsansatz in Anlehnung an EN ISO 9283

Um die Bewertung von IPS reproduzierbar und anhand gängiger, industrieller Qualitätsmaßstäbe und Standards durchführen zu können, wird ein Evaluationsansatz in Anlehnung an EN ISO 9283 [14] gewählt. Diese Norm beinhaltet Leistungskriterien und Testmethoden zur Evaluierung von Industrierobotern. In ihr wird die *Genauigkeit A_S* als Differenz zwischen der Position eines Referenzpunkts $O_{ref}(x_{ref}, y_{ref}, z_{ref})$ und dem Schwerpunkt einer Punktwolke $\bar{P}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ bestehend aus allen gemessenen Punkten $P_i(x_i, y_i, z_i)$; $i=1 \dots n$ (Bild 1) definiert.

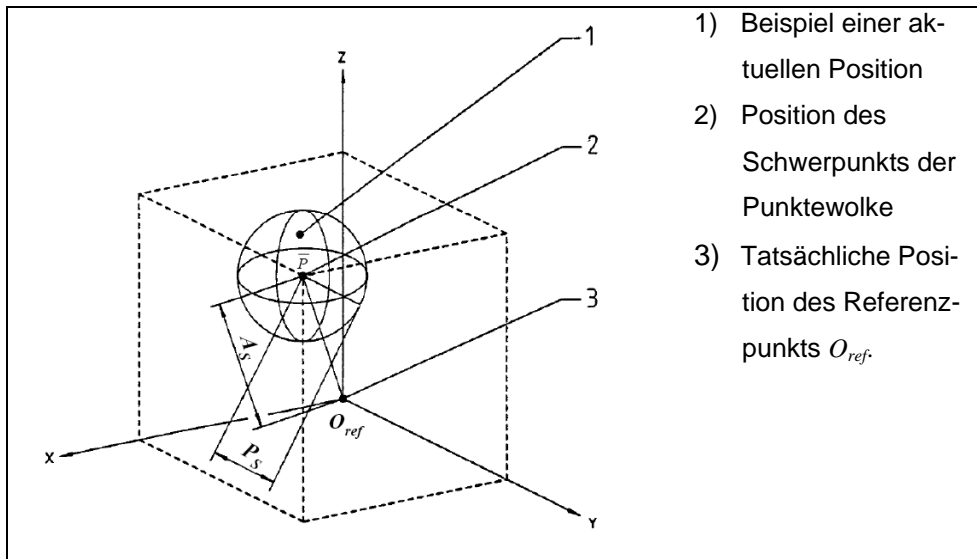


Bild1: Genauigkeit und Präzision nach der Definition in EN ISO 9283.

Die mathematische Definition der Genauigkeit A_s (beschrieben als *positioning accuracy* in EN ISO 9283) folgt als euklidische Distanz zu:

$$A_s = \|\bar{P}O_{ref}\| = \sqrt{(\bar{x} - x_{ref})^2 + (\bar{y} - y_{ref})^2 + (\bar{z} - z_{ref})^2} \text{ mit}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i.$$

Genauigkeit basiert hier also ausschließlich auf den Distanzen zwischen dem Mittelwert der Messwerte (Schwerpunkt) und dem Referenzpunkt; die Varianz spielt dabei keine Rolle.

Der Wert für die Präzision P_s (beschrieben als *positioning repeatability* in EN ISO 9283) ist definiert als die Distanz aller gemessenen Werte P_i vom Schwerpunkt der Punktwolke. Damit ergibt sich eine Sphäre mit definiertem Radius um \bar{P} (Bild 1). Die mathematische Definition der Präzision folgt damit zu:

$$P_s = \bar{l} + 3S_s \text{ mit}$$

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i$$

als Bezeichnung des gaußschen Mittelwerts der Distanz der gemessenen Punkte P_i von \bar{P} :

$$l_i = \|P_i\bar{P}\| = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2}$$

Die Varianz S_s ist entsprechend gegeben als:

$$S_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - \bar{l})^2}{n-1}}$$

Aus der aufgeführten mathematischen Beschreibung wird deutlich, dass P_s ein zusammengesetztes Maß darstellt, welches sowohl die Beschreibung des Mittelwerts, als auch der Varianz der Distanzen zwischen den gemessenen Werten und dem Schwerpunkt der Punktwolke beinhaltet, wohingegen A_s beschreibt, wie weit der Schwerpunkt dieser Wolke vom Referenzpunkt O_{ref} entfernt ist.

Da ein Vertrauensintervall von 95% bei weitem nicht zur Einhaltung industrieller Qualitätsmaßstäbe ausreicht, wird in der Definition der *Präzision* in Anlehnung an EN ISO 9283 der Faktor 3 gewählt, um ein entsprechendes Vertrauensintervall von 99% sicherzustellen.

Weiterhin ist \bar{l} ein Maß für die Ausdehnung oder den „Durchmesser“ der Wolke, wobei S_s ein Maß für deren „Deformation“ darstellt. So kann beispielsweise A_s den Wert Null annehmen, für den Fall, dass \bar{P} deckungsgleich mit O_{ref} ist, wohingegen \bar{l} trotzdem einen Wert größer Null annehmen kann. Für den Fall, dass S_s den Wert Null annimmt, wäre hingegen eine Verteilung der Messergebnisse innerhalb konzentrischer Sphären um \bar{P} gegeben (Bild 2).

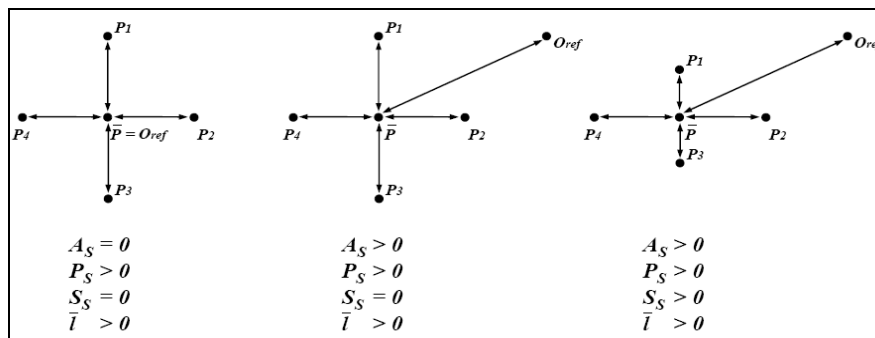


Bild 2: Zusammenhang zwischen *Genauigkeit* A_s , *Präzision* P_s , dem Durchmesser einer Punktwolke beschrieben durch \bar{l} und deren Deformation beschrieben durch S_s .

Die vorgeschlagene Evaluationsmethode erlaubt folglich nicht nur die Berechnung der Werte für die Kenngrößen *Genauigkeit* und *Präzision*, sondern auch die Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich der Unterscheidung zwischen systematischen Fehlern (resultierend in großen Werten für A_s) und zufälligen Fehlern (resultierend in großen Werten für P_s).

4. Fallstudie

4.1 Die *SmartFactory*^{KL}

Gegründet im Jahr 2005 in Kaiserslautern, ist die *SmartFactory*^{KL} Europas erstes, hersteller-unabhängiges Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationszentrum für industrielle Informations- und Kommunikationstechnologien [15]. Organisiert als Public-Private-Partnership, öffnet die Technologie-Initiative einen kreativen Raum für Entwickler, Hersteller und Anwender moderner Fabriktechnologien zur gemeinsamen Arbeit an aktuellen Forschungsthemen.

Durch metallische Bauteile, Verrohrungen, Glaskolonnen, und bauliche Hindernisse wie Pfeiler und Vorsprünge, Förder- und Lagerzeuge sowie die Nutzung verschiedener Funktechnologien bietet die *SmartFactory*^{KL} realitätsnahe Testbedingungen für IPS.

4.2 Szenario optimaler Testbedingungen

Um herauszufinden, ob die ausgewählten IPS die erwarteten Leistungskriterien erfüllen, erfolgt ein Systemtest unter vergleichsweise optimalen Einsatzbedingungen:

1. Keine Hindernisse beeinflussen die Signalausbreitung zwischen Tag und Sensor
2. Zum Zeitpunkt der Messwerterfassung interferieren keine anderen Radio- oder Ultraschallsignale mit den zur Positionsbestimmung emittierten Signalen
3. Die zur Positionsbestimmung emittierten Signale werden durch eine ausreichend große Anzahl an Sensoren bzw. Tags empfangen, um eine bestmögliche Positionsbestimmung zu gewährleisten

Basierend auf diesen Voraussetzungen erfolgt die Installation der IPS sowie die Auswahl eines Testareals mit entsprechenden Referenzpunkten.

Da es für das Ubisense-System mit seinen UWB-Sensoren möglich ist, Zellen mit einer Seitenlänge bis zu ca. 100 m aufzuspannen, kann eine Abdeckung der gesamten *SmartFactory*^{KL} durch Montage der Sensoren in den Ecken der Halle erfolgen. Dabei ist garantiert, dass im Testgebiet optimale Voraussetzungen für eine 3D Positionsbestimmung herrschen, da an jedem Ort die von Tags emittierten UWB-Signale durch zwei oder mehr Sensoren empfangen werden [16].

Da im Vergleich dazu die Sendeleistung der Cricket Beacons stärker limitiert ist, kann mit einer entsprechenden Installation nicht die komplette Fläche der *SmartFactory*^{KL} abgedeckt werden. Demzufolge wird mit der zur Verfügung stehenden Anzahl von 9 Beacons ein rechteckiges Netz (6x3 m) an der Hallendecke über dem Testareal aufgespannt. Die Lage der Referenzpunkte in der geometrischen Mitte zwischen den Beacon-Positionen wird entsprechend Bild 3 gewählt, damit jeweils mindestens drei Beacons an diesen miteinander in Ein-

griff stehen. Mit dieser Konfiguration ist für beide IPS eine optimale Visibilität von Sensoren bzw. Beacons gegeben.

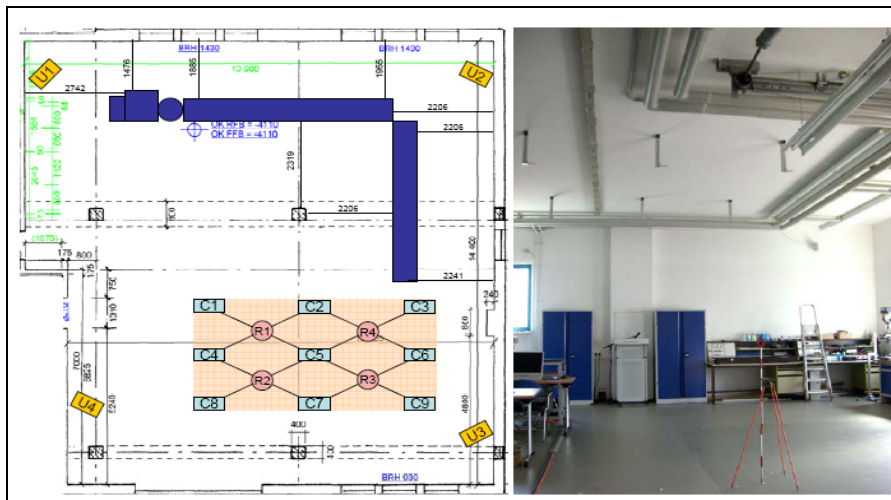


Bild 3: Platzierung der Ubisensoren (U1-U4), der Cricket Beacons (C1-C9) und Position der Referenzpunkte (R1-R4) für die Systemevaluierung unter optimalen Bedingungen.

4.3 Szenario realitätsnaher Testbedingungen

Nach ersten durchgeführten Testreihen, welche zur Verifikation von Systemeigenschaften unter optimalen Testbedingungen dienen, wird das Verhalten der IPS in einer industrietypischen, heterogenen Testumgebung evaluiert. Zu diesem Zweck wird das Netz der Cricket Beacons geometrisch identisch über der Produktionsanlage der *SmartFactory^{KL}* angeordnet. Gleiches gilt auch für die neuen Referenzmesspunkte (Bild 4). Auf eine Neuordnung der Ubisensoren kann verzichtet werden, da das Testareal auch für diesen Fall durch die existierende Zelle abgedeckt wird.

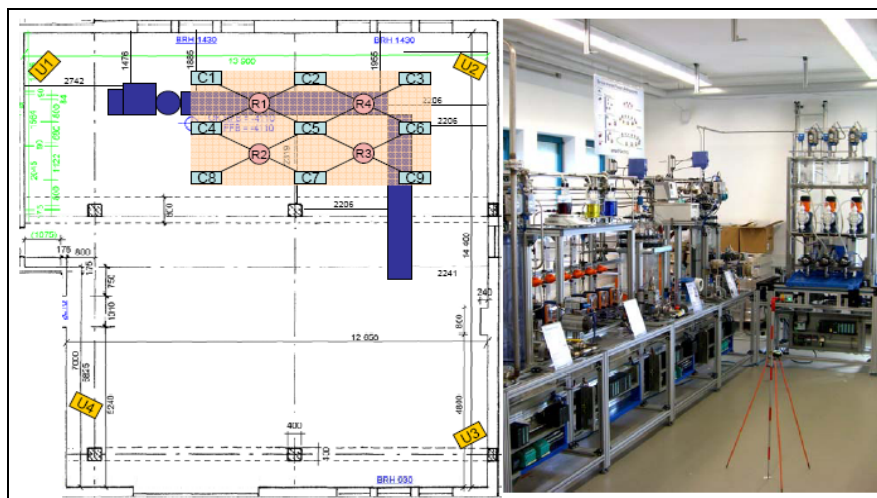


Bild 4: Platzierung der Ubisensoren (U1-U4), der Cricket Beacons (C1-C9) und Position der Referenzpunkte (R1-R4) für die Evaluierung unter realitätsnahen Bedingungen.

4.5 Messergebnisse unter optimalen Testbedingungen

Im Rahmen erster Testmessungen wird geprüft, in wie weit die Systeme in der Lage sind, akkurate und präzise Werte für Tag-Positionen unter optimalen Einsatzbedingungen zu erzielen. Tabelle 1 zeigt exemplarisch einige an den Referenzpunkten 1 und 2 ermittelten Messergebnisse. Obwohl bei der Auswertung der Messreihen von einer *Präzision* P von 99% ausgegangen wird, sind die Ergebnisse für die *Genauigkeit* A vergleichbar mit Werten, die zuvor in anderen Versuchen ermittelt wurden [10] oder in Produktspezifikationen gegeben werden [15]. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Systeme nahe am Optimum abgestimmt und kalibriert sind. Mit dem postulierten Evaluierungsansatz kann jedoch noch ein besseres Indiz hierfür gefunden werden. Der im Verhältnis zu P_S sehr geringe Wert von A_S zeigt, dass auftretende Fehler in erster Linie durch Systemrauschen und nicht durch eine, Bias-verursachende falsche Installation oder Inbetriebnahme hervorgerufen werden.

Tabelle 1: Exemplarische Messergebnisse unter optimalen Testbedingungen

Ref. Pt.	A (m)	P (%)	A_S (m)	P_S (m)
<i>Ubisense System</i>				
1	0,128	99	0,097	0,070
2	0,244	99	0,098	0,228
<i>Cricket System</i>				
1	0,038	99	0,017	0,028
2	0,051	99	0,035	0,041

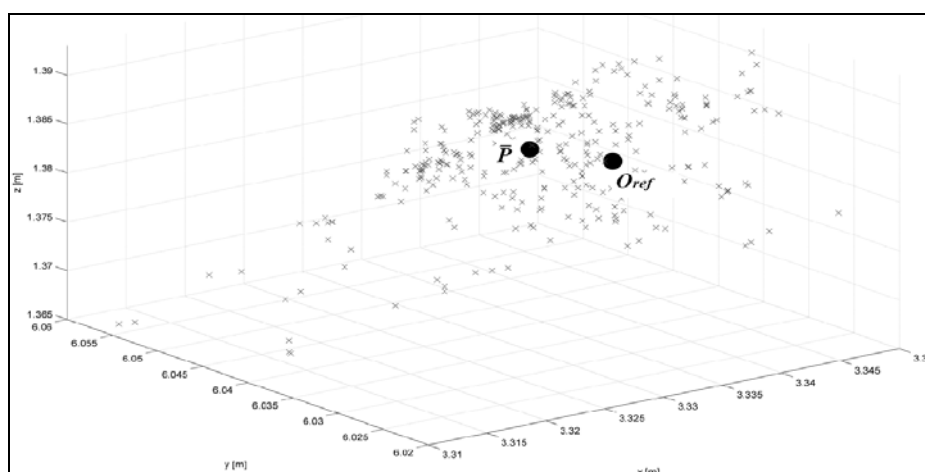


Bild 5: Scatter Plot der Messergebnisse an Referenzmesspunkt 1 (Cricket System); die wahre Position des Referenzmesspunktes befindet sich innerhalb der Punktwolke der gemessenen Werte ($A_S < P_S$).

Die wahren Werte für die Referenzpunkte 1 und 2 sind umgeben von der Punktwolke bestehend aus gemessenen Werten (Bild 5 für Punkt 1). Somit können Werte zwischen 0,07 m bis 0,25 m (Ubisense) und 0,02 m bis 0,05 m (Cricket-System) als Bestwerte hinsichtlich *Genauigkeit* und *Präzision* der getesteten Systeme angesehen werden.

4.6 Messergebnisse unter realitätsnahen Testbedingungen

Nach dem Vergleich der IPS in einer Umgebung mit nahezu keinen Störquellen steht die Evaluation der Systeme unter Bedingungen ähnlich denen in Produktionsumgebungen im Fokus des Interesses. Die Konfiguration der IPS bleibt unverändert, lediglich die neuen Koordinaten der umplatzierten Beacons werden im Cricket-System hardcodiert.

Tabelle 2 zeigt Ergebnisse, welche an Referenzmesspunkten nahe an bzw. innerhalb der Produktionsanlage ermittelt wurden. Wie aus Bild 4 ersichtlich, befinden sich die Referenzmesspunkte 1 und 4 innerhalb der Anlage. Hierbei kann für den Fall des Ubisense-Systems insbesondere an Punkt 1 eine niedrige Performanz festgestellt werden. Vermutlich führen Reflektionen an metallischen Strukturen in unmittelbarer Nähe des Referenzmesspunkts dazu, dass die von einem Tag emittierten UWB-Signale einzelne Ubisensoren nicht zuverlässig erreichen. Dies resultiert insbesondere in hohen Werten für P_S , welche ein Indiz für die starke Fluktuation eingehender Signale darstellen. Demgegenüber stehen sehr gute Werte für A_S und P_S an Punkt 4. Im Unterschied zu Punkt 2 können an Punkt 4 von mindestens drei Ubisensoren eingehende Signale empfangen werden, was offensichtlich direkt zu einer besseren Systemperformanz führt.

Tabelle 2. Exemplarische Messergebnisse unter realitätsnahen Testbedingungen

Ref. Pt.	A (m)	P (%)	A_S (m)	P_S (m)
<i>Ubisense System</i>				
1	1,125	99	0,609	1,271
2	0,616	99	0,475	0,125
3	1,243	99	0,907	0,475
4	0,351	99	0,156	0,306
<i>Cricket System</i>				
1	--	99	--	--
2	0,078	99	0,059	0,029
3	0,064	99	0,051	0,019
4	0,072	99	0,015	0,079

Die Werte für *Genauigkeit* und *Präzision* an den Referenzpunkten 2 und 3 offenbaren ein unvorhergesehenes Systemverhalten. Da die Punkte sich in einem gewissen Abstand zur Anlage sowie zu infrastrukturellen Hindernissen befinden, können von ihrer Position emittierte Signale durch mindestens drei Ubisensoren detektiert werden, was in relativ guten Werten für P_S resultiert. Im Kontrast hierzu zeigt das Ubisense-System an diesen Referenzpunkten vergleichsweise schlechte Werte für A_S , was die Vermutung nahelegt, dass das Systemverhalten an dieser Stelle durch konstante Veränderungen bei Signallaufzeiten oder durch Signalablenkungen gestört wird, was zu einer Bias-behafteten Ortsinformation führt (Bild 6).

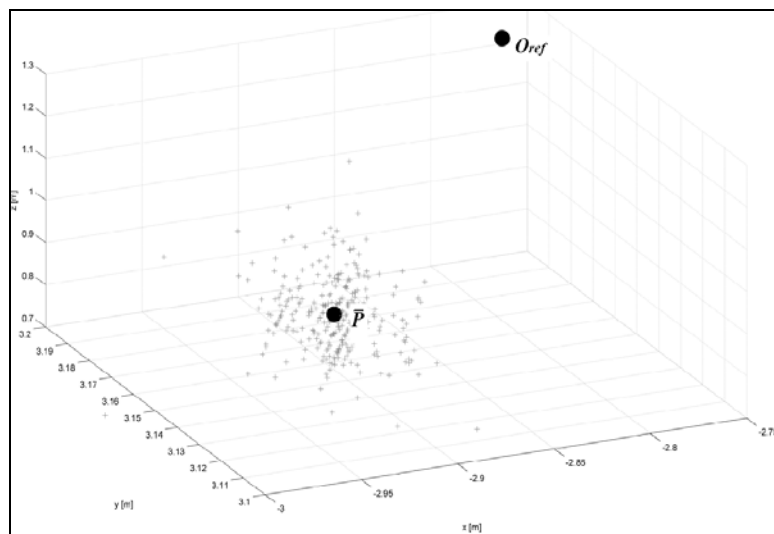


Bild 6: Scatter Plot der Messergebnisse an Referenzmesspunkt 2 (Ubisense-System); die wahre Position des Referenzmesspunktes befindet sich weit außerhalb der Punktwolke der gemessenen Werte ($A_S > P_S$).

Obwohl das Cricket-System prinzipiell in der Lage ist bessere Werte für *Genauigkeit* und *Präzision* als das Ubisense-System zu erzielen zeigt es an den Referenzmesspunkten ein ähnliches Systemverhalten. Bei Punkten innerhalb der Anlage führen verschiedenste, durch Hindernisse verursachte Reflektionen (z.B. große Glaskolonnen an Punkt 4) oder eine fehlende Sichtlinie entweder zum kompletten Ausfall einer Positionsinformation oder einem sehr hohen Wert für P_S . Für Punkte in der Nähe der Anlage oder von anderen Hindernissen (wie an den Punkten 2 und 3) scheinen indirekte Störeffekte die zu hohen, Bias-behafteten Werten für A_S und relativ niedrigen Werten für P_S führen, zu dominieren.

Generell zeigen jedoch beide Systeme in einem realitätsnahen Anwendungskontext aufgrund der oben aufgeführten Effekte eine deutlich verringerte Performanz als unter optimalen Testbedingungen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Zur Evaluierung von IPS anhand in der Industrie gängiger Qualitätsanforderungen wurde in dem vorliegenden Beitrag ein mathematischer Ansatz in Anlehnung an EN ISO 9283 präsentiert. Im Vergleich zu derzeit gängigen Ansätzen basiert die dargelegte Methode auf einer klaren mathematischen Interpretation der Kenngrößen *Genauigkeit* und *Präzision*. Darüber hinaus erlaubt die Methode eine Unterscheidung zwischen systematischen und zufälligen Fehlern. Zur Verifikation des Ansatzes wurden IPS sowohl basierend auf Ultraschall-, als auch auf UWB-Technologie in der *SmartFactory*^{KL} getestet.

Unter optimalen Bedingungen zeigten beide Systeme erwartungsgemäßes Verhalten und lieferten Ergebnisse im Bereich zwischen 0,07 m bis 0,25 m (UWB-Technologie) bzw. 0,02 m bis 0,05 m (Ultraschall-Technologie) für *Genauigkeit* und *Präzision*. Allerdings fielen die Ergebnisse unter realitätsnahen Bedingungen, wie sie beispielsweise in Produktionsumgebungen vorliegen, signifikant schlechter aus. Mit der eingesetzten Methode konnte festgestellt werden, dass auch unter diesen Bedingungen beide IPS ein ähnliches Systemverhalten zeigen. An Punkten innerhalb der Produktionsanlage kommt es aufgrund hoher Fluktuationen bei eingehenden Signalen zu großen Werten für P_S (geringe *Präzision*), wohingegen es an Punkten in der Nähe von Hindernissen und Störquellen zu Bias-behafteten Signalen kommt, die zu großen Werten für A_S (geringe *Genauigkeit*) führen. Die Ergebnisse für die System-Performanz hinsichtlich *Genauigkeit* und *Präzision* variieren von 1,30 m bis 0,12 m für das getestete UWB-System bzw. 0,08 m bis 0,015 m für das getestete Ultraschall-System. Da die Werte abhängig vom Ort ihrer Aufzeichnung Schwankungen von bis zu einer Größenordnung unterliegen, sind umfangreiche Tests im Vorfeld eines Einsatzes von IPS sehr zu empfehlen. In diesem Zusammenhang könnte sich in Zukunft die Erstellung von Ortungsprofilen als sinnvoll erweisen, um ein besseres Verständnis für das stark variierende Systemverhalten in einer Produktionsumgebung zu bekommen und um andererseits eine belastbare Datenbasis zur Erstellung von Heuristiken oder der Kombination verschiedener IPS mittels Sensordatenfusion zur erhalten.

Da die vorgestellte Methode eine in höchstem Maße reproduzierbare und transparente Erhebung von Messwerten befördert, sollen zukünftig weitere Systeme, beispielsweise basierend auf Infrarot-, Laser-, oder Bluetooth-Technologie damit untersucht werden.

Neben der präzisen Bestimmung in wie weit eine Technologie in der Lage ist, adäquate Werte für die Kenngrößen *Genauigkeit* und *Präzision* bereitzustellen, sollen zukünftige Evaluationsansätze auch Kenngrößen wie Latenzzeit, Energieverbräuche oder das dynamische Verhalten eines Systems in Betracht ziehen, um somit eine ganzheitlichere, Sichtweise auf derzeitige Technologien zur Ortsbestimmung im Innenraum zu erlauben.

Literatur

- [1] Görlich, D., Stephan, P., Quadflieg, J. (2007). Demonstrating Remote Operation of Industrial Devices using Mobile Phones. 4th Int. Conf. on Mobile Technology, Applications and Systems. pp. 482-485. Singapore.
- [2] Schroeder, J., Galler, S., Kyamakya, K. (2005). A Low-Cost Experimental Ultra-Wideband Positioning System. IEEE Int. Conf. on UWB. pp. 632-637. Zürich. Switzerland.
- [3] Feldmann, S., Kyamakya, K., Zapater, A., Lue, Z. (2003). An indoor Bluetooth-based positioning system: Concept, Implementation and experimental evaluation. Int. Conf. on Wireless Networks. Las Vegas. USA.
- [4] Fernandez-Madrigal, J., Cruz-Martin, E., Gonzalez, J., Galindo, C., Blanco, J. (2007). Application of UWB and GPS Technologies for Vehicle Localization in Combined Indoor-Outdoor Environments. Int. Symp. on Signal Processing and its Applications. Sharajah. U.A.E.
- [5] Corrales, J.A., Candelas, F.A., Torres, F. (2008). Hybrid tracking of human operators using IMU/UWB data fusion by a Kalman filter. *3rd ACM/IEEE Int. Conf. on Human robot interaction*. pp. 193-200. Amsterdam. Netherlands.
- [6] Hightower, J., Boriello G. (2001) Location Systems for Ubiquitous Computing. IEEE Computer. 34(8). pp. 57-66.
- [7] Coyle L., Ye J., Loureiro E., Knox S., Dobson S., Nixon P., (2007). A proposed approach to evaluate the accuracy of tag-based location systems. *Ubicomp 2007 Workshops*. pp. 292 – 296. Innsbruck. Austria.
- [8] Benson, J.P., Sreenan. C.J. (2004). High-Precision Ad-Hoc Indoor Positioning in Challenging Industrial Environments. Proc. WPNC2004, Hanover. Germany.
- [9] Kolodziej, K., and Hjelm, J. (2006). Local Positioning Systems. Taylor & Francis Group. Boca Raton. USA.
- [10] Priyantha, N.B., (2005) The Cricket Indoor Location System. PhD thesis. MIT.
- [11] Dobson, S., Coyle, L., and Nixon. P. (2007). Hybridising events and knowledge as a basis for building autonomic systems. IEEE TCAAS Letters.
- [12] Brunell, J. (2007). UWB Finding a Place in the RTLS Market. RFID Update. <http://www.rfidupdate.com/articles>
- [13] Steggle, P., Gschwind, S. (2005). The Ubisense Smart Space Platform, Advances in Pervasive-Computing. Adjunct Proc. of the 3rd Int. Conf. on Pervasive Computing. Vol. 191. Munich. Germany.
- [14] EN ISO 9283. (1999). Manipulating industrial robots. pp. 11-14. Beuth Verlag. Berlin.
- [15] Zuehlke, D. (2008). SmartFactory – from Vision to Reality in Factory Technologies. Plenary Paper. 17th IFAC WC '08. pp 82-89. Seoul. South Korea.
- [16] Ubisense AG. (2007). Ubisense Precise Real-time Location – System Overview. <http://www.ubisense.net>