

Indoor-Positionierung mit künstlichen Magnetfeldern

Von der Innenraumpositionierung zu standortbezogenen Diensten in Gebäuden

Jörg Blankenbach und Abdelmoumen Norrdine

Zusammenfassung

Seit einigen Jahren wird intensiv an der Entwicklung von Systemen zur automatischen Positionsbestimmung in Gebäuden geforscht. Verschiedene Technologien wie Ultraschall, UWB, WLAN sowie hybride Lösungen werden zur Indoor-Positionierung aktuell untersucht. Viele der existierenden Systeme stoßen jedoch an ihre Grenzen in Innenräumen, ausgelöst durch Multipath-Effekte, Signalabschattungen oder ein erhöhtes Signalrauschen. In diesem Beitrag wird ein neuartiges Indoor-Positionierungssystem zunächst für die 1D- und 2D-Positionierung vorgestellt. Das auf künstlichen Magnetfeldern basierende System unterliegt keinen Multipath-Effekten und Abschattungen in Gebäuden, sodass eine Lokalisierung auch in schwierigen Innenraumumgebungen erfolgen kann.

Summary

In recent years there has been a considerable research on the development of indoor positioning systems. Several kinds of technologies were utilized such as ultrasonic, UWB, WLAN and hybrid based solutions. However, these systems encounter many difficulties in indoor environments such as multipath effects, signal obstruction and noises. In this contribution an indoor positioning system is presented and its performance is evaluated for 1D and 2D positioning tests. The presented

DC magnetic signal based system shows no special multipath effects and has excellent characteristics for penetrating various obstacles. In result, localization is possible even in harsh indoor environments.

Schlüsselwörter: Indoor-Positionierung, Magnetisches Positionierungssystem, Standortbezogene Innenraumdienste, Adaptive Signalverarbeitung

1 Einführung

In den letzten Jahren erweckt das Thema »Indoor-Positionierung« ein großes Interesse sowohl in der Forschung als auch in der Industrie, da zahlreiche Anwendungen – angefangen bei der Fußgängernavigation über das Katastrophenmanagement bis hin zu Wartung und Inspektion – von der Möglichkeit der automatischen Positionsbestimmung im Innenraum profitieren könnten. Nicht zuletzt verlangen die Entwicklungen im Bereich der mobilen IT nach Möglichkeiten der Indoor-Ortung z. B. für standortbezogene Dienste in Gebäuden.

In einem aktuellen Forschungsprojekt, durchgeführt an den Geodäsie-Instituten der TU Darmstadt und RWTH Aachen, wird ein System auf der Basis von künstlichen Magnetfeldern für die (präzise) Ortung innerhalb von Gebäuden untersucht. Das Prinzip des Indoor-Positionierungssystems MILPS (Magnetic Indoor Local Positioning System) basiert auf Gleichmagnetfeldern, die von stromdurchflossenen Spulen erzeugt werden. Durch Messen der Magnetfeldkomponenten von mehreren Spulen kann die unbekannte Position einer Mobilstation bestimmt werden. Bei vielen existierenden Infrastruktur-basierten Systemen, die in der Regel optische Wellen, Funk oder Ultraschall verwenden, wird die Positionsschätzung durch Dämpfung, Fading, Multipath oder Signalverzögerung negativ beeinflusst. Magnetische Felder hingegen durchdringen Baumaterialien ohne Signalausbreitungsfehler, d.h. auch bei fehlender direkter Sichtverbindung (None-Line-of-Sight, NLoS) zwischen Sender und Empfänger. Darüber hinaus vereinfacht der Einsatz von Magnetfeldern die Nutzung des Systems, da weder spezielle Kommunikationsprotokolle noch komplizierte Medienzugriffverfahren benötigt werden.

Die Verwendung von künstlich erzeugten Magnetfeldern für Ortungszwecke wurde in den letzten Jahrzehnten bereits vereinzelt untersucht (Kuipers 1975, Raab et al. 1979, Prigge 2004), auch zwei kommerzielle Systeme befinden sich am Markt (Ascension 2012, Polhemus 2012). Im Gegensatz zu dem in dieser Arbeit beschriebenen MILPS wurde die Mehrzahl der existierenden magnetfeldbasierten Systeme jedoch für das Tracking im Bereich der virtuellen Realität entwickelt und wird in verschiedenen künstlerischen, industriellen (Callmer 2010) oder biomedizinischen Anwendungsbereichen (Chao Hu 2006) in speziell dafür geschaffenen (Labor)Umgebungen eingesetzt. Die Magnetfelderzeugung basiert in der Regel auf der Verwendung von konzentrischen Spulen oder Permanentmagneten und beschränkt sich auf kleine Messvolumen (typischerweise mit einem Radius kleiner als 3 m).

Im Folgenden werden das MILPS-Funktionsprinzip, die Signalverarbeitung sowie Testmessungen mit einem Prototypen beschrieben.

2 MILPS – Magnetic Indoor Local Positioning System

Die Grundidee des hier vorgestellten Ansatzes ist es, ein Indoor-Positionierungssystem zu entwickeln, welches passive Sensorik verwendet, jedoch vom Funktionsprinzip wie ein aktives System aufgebaut ist. Das System basiert auf künstlichen Magnetfeldern, die durch Spulen generiert werden (= aktiv). Die Spulen dienen dabei als Referenzstationen (RSi) in einem lokalen Bauwerkskoordinatensystem. Mit Hilfe eines Magnetfeldsensors als Mobilstation (MS) werden die vorhandenen Spulenfelder im

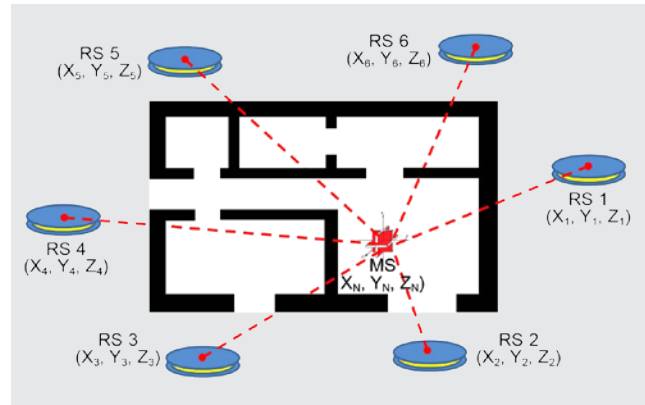


Abb. 1: Systemarchitektur von MILPS mit mehreren Referenzstationen RSi und einer Mobilstation MS

unbekannten Punkt detektiert (= passiv), sodass anschließend die 3D-Position (X_{MS}, Y_{MS}, Z_{MS}) z.B. durch räumlichen Bogenschnitt ermittelt werden kann (Abb. 1). Die Spulen werden dabei sequentiell mit Hilfe einer Echtzeituhr aktiviert, um zwischen ihren Magnetfeldern unterscheiden zu können (Time Division Multiplexing, TDM).

3 Experimentalsystem

Auf der Grundlage von Magnetfeldtheorie und Softwaresimulationen (vgl. Blankenbach/Norrdine 2010a und 2010b) wurde zunächst ein experimentelles Messsystem aufgebaut. Das Experimentalsystem besteht aus drei selbst hergestellten Spulen mit einem Radius $r_0 = 0,25$ m und einer Windungszahl $N = 140$, Netzgeräten als Stromquelle und Relaisseinheiten für jede Spule sowie einem kommerziellen Magnetfeldsensor (Honeywell HMR 2300). Der magnetoresistive Sensor ist in der Lage, alle drei Komponenten des Magnetfeldvektors B zu messen. Der Messbereich liegt zwischen ± 2 G mit einer Auflösung von $67 \mu\text{G}$.

Das Experimentalsystem im Versuchsaufbau ist in Abb. 2 dargestellt. Die Steuerung der Stromquelle einer Spule und das Auslesen der Sensordaten (Abtastperiode $T_s = 6.5$ ms) erfolgte über die parallele bzw. serielle Schnittstelle eines angeschlossenen Messrechners.

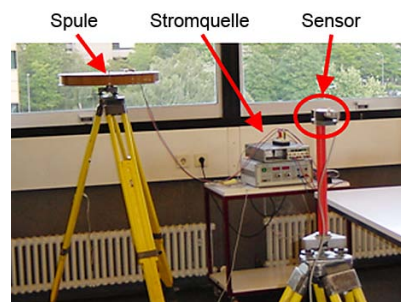


Abb. 2: Versuchsaufbau des Experimentalsystems

4 Signalverarbeitung und adaptive Rauschunterdrückung

Als Beobachtungsgrößen für die 3D-Positionsbestimmung werden die Raumdistanzen zwischen den Zentren der Referenzspulen und dem Magnetfeldsensor benötigt. Zur Ableitung der Strecken kann der folgende Zusammenhang (vgl. u. a. Lehner 2006) herangezogen werden:

$$r = \sqrt[3]{\frac{\mu_0 N I F \sqrt{1 + \sin \varphi}}{4\pi B}} \quad (1)$$

Dabei beschreiben I die angelegte Stromstärke, N die Windungsanzahl der Spule, F die Größe der Spulengrundfläche, μ_0 die magnetische Feldkonstante, B den Betrag des aufgezeichneten Magnetfeldes (magnetische Flussdichte) sowie φ den Elevationswinkel zwischen Spule und Sensor.

Da weitere natürliche (z. B. Erdmagnetfeld) und künstliche Magnetfelder (z. B. verursacht durch Elektrogeräte) Interferenzen mit dem Spulenfeld hervorrufen und sich damit im gemessenen Magnetfeldvektor B niederschlagen, wurde ein *differentielles Messprinzip* entwickelt. Während der Messung wird dazu die Stromrichtung zwischen den Einzelmessungen umgepolt, um durch Differenzbildung der erhaltenen alternierenden magnetischen Signale alle Störfelder mit einer Frequenz niedriger als die Umschaltfrequenz (Hochpassfilterung) zu eliminieren. Abb. 3 (oben) zeigt ein beobachtetes Signal (blau) bei einer Entfernung von 12 m zum Spulenzentrum; die Abtastfrequenz beträgt hier 154 Hz.

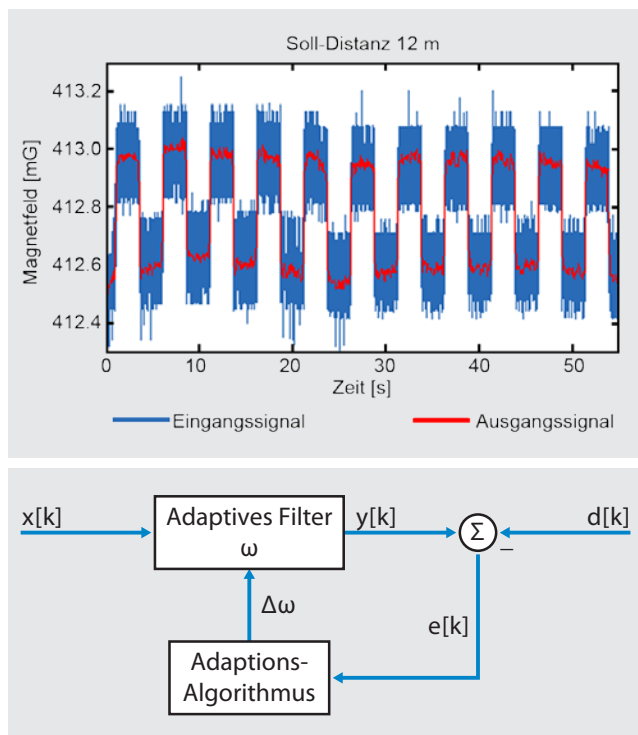


Abb. 3: Gemessenes und tiefpassgefiltertes Magnetfeldsignal (oben) und Prinzip der Signalfilterung zur adaptiven Rauschunterdrückung (unten)

Neben den einzelnen *Clustern*, die durch die oben beschriebene Umschaltung der Stromrichtung entstehen, sind im abgebildeten Beispielsignalbild überlagerte, kurzperiodische Rauschanteile zu erkennen. Um diese Rauschanteile zu reduzieren, wurde ein digitales Tiefpassfilter mit endlicher Impulsantwort (Finite Impulse Response, FIR) mit einer Grenzfrequenz von 1 Hz adaptiert (vgl. Blankenbach, Norrdine und Hellmers 2011). In Abb. 3 (oben) ist das gefilterte Signal (rot) dem Eingangssignal gegenübergestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die hochfrequente Schwingung, die dem Messsignal überlagert ist, herausgefiltert werden konnte. Das Ausgangssignal ähnelt im Ergebnis einem Rechtecksignal. Neben den niederfrequenten Interferenzen treten – verursacht durch die Gebäudeelektrik – zusätzliche instationäre Störfelder auf. Zu deren Behandlung wurden Untersuchungen mit Hilfe von Referenzsensoren und *adaptiven Filtern* (Widrow 1975, Hofbauer 2000) durchgeführt, um die auftretenden Frequenzänderungen korrigieren zu können. Dazu wird für den Standort des Referenzsensors ein ideales Signal d berechnet und durch iterative Differenzbildung mit dem aufgezeichneten Signal x (bzw. dem Signal des letzten Iterationsschrittes y) ein Fehler-signal e erstellt (Abb. 3 unten). Aufgrund der synchronen Datenaufnahme von Referenz- und Messsensor kann so eine adaptive Rauschunterdrückung in Echtzeit erfolgen (Blankenbach, Norrdine und Hellmers 2011).

5 Reichweiten- und Genauigkeitsuntersuchungen

Nach Implementierung der Signalverarbeitungsalgorithmen wurden Reichweiten- und Genauigkeitsuntersuchungen durchgeführt. An einem Messszenario im Universitätsgebäude können die Ergebnisse exemplarisch demonstriert werden. Im dargestellten Szenario (Abb. 4 links) befand sich die Spule im Treppenhaus, der Sensor wurde auf verschiedenen Punkten auf einer horizontalen, linearen Messlinie angeordnet. Durch die horizontale Anordnung von Sensor und Spulen vereinfacht sich der in (1) dargestellte Zusammenhang zwischen Raumstrecke und Magnetfeld, da der Elevationswinkel $\varphi = 0$ wird.

Ein Maß für die sichere Detektierbarkeit des Magnetfeldsignals ist das Signal-to-Noise-Ratio (SNR). In Abb. 4 (rechts) ist daher zunächst das beobachtete SNR aufgetragen, wobei zu beachten ist, dass verschiedene Hindernisse die Messungslinie kreuzen (Abb. 4 links): nach ca. 2 m sind Spule und Sensor durch eine Stahlbetonwand (26 cm Dicke) getrennt, in Entfernungen zwischen 6 und 9 m befinden sich Verteilerkästen sowie metallische Rohrleitungen und bei 5 m, 9 m, 12,5 m bzw. 15,5 m schneidet die Linie eingezogene Kalksandsteinwände. Neben dem Messsensor wurden zwei Referenzsensoren im Abstand von ca. 6 und 12 m von der Spule im lotrechten Abstand von ca. 3 m zur Messungslinie für die adaptive Filterung aufgestellt.

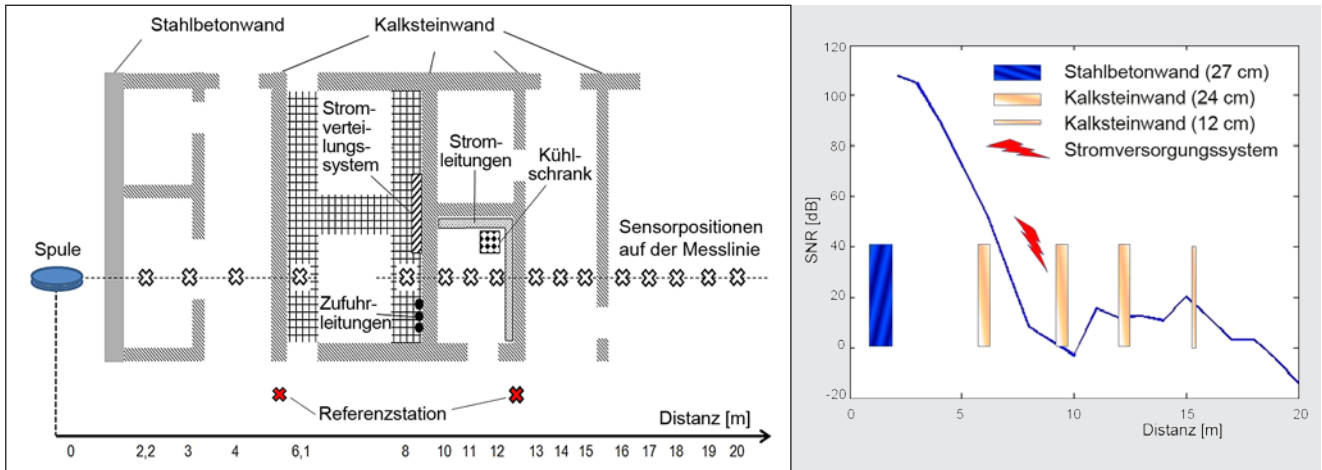


Abb. 4: Lage der Magnetspule und des Sensors (links) und die berechnete SNR (rechts) im Beispielszenario

Am vorliegenden Beispiel, bei dem mit einer Stromstärke von 12 A gemessen wurde, kann gezeigt werden, dass das SNR mit wachsender Distanz aufgrund der invers kubischen Abhängigkeit zwischen Feldstärke und Entfernung (siehe (1)) schnell abnimmt. Auch in der Nähe von elektrischen Rauschquellen verschlechtert sich das SNR. Hindernisse wie Wände oder metallische Gegenstände rufen hingegen keinen Verlust der SNR-Effizienz hervor. Im dargestellten Beispielszenario konnte das Spulensignal bis zu einer Distanz von ca. 15 m zuverlässig detektiert und ausgewertet werden.

Zur Untersuchung der Distanzmessgenauigkeit wurden Wiederholungsmessungen (unter konstanten Versuchsbedingungen) und Vergleiche mit Sollstrecken durchgeführt. Im obigen Beispiel ergaben sich Streckenabweichungen aus dem Soll-Ist-Vergleich (die Ergebnisse der durchgeführten Soll-Ist-Vergleiche werden im Folgenden als äußere Genauigkeit – im Sinne von Richtigkeit – bezeichnet) von ca. 20 cm im Nahbereich (0–8 m) und ca. 1 m im Bereich der maximalen Reichweite (Abb. 5). Durch den Einsatz der Referenzsensoren und adaptiver Filterung konnte die äußere Genauigkeit auf unter 10 cm für den Nahbereich und unter 40 cm für den Bereich zwischen 8 und 15 m verbessert werden. Auch

die Standardabweichung, abgeleitet aus den Wiederholungsmessungen (innere Genauigkeit), konnte durch den Einsatz der Referenzsensoren verbessert werden und liegt bei ca. 1 cm im Nahbereich bzw. 10 cm im Fernbereich.

Der Vergleich zwischen äußerer und innerer Genauigkeit sowie die Zunahme der Streckenabweichung mit wachsender Distanz beim Soll-Ist-Vergleich lassen auf eine vorhandene Modellabweichung (systematische Abweichungen) schließen. Aus weiteren Messungen in einer Laborumgebung wurde daher eine Trendfunktion mit Hilfe eines linearen Regressionsansatzes abgeleitet, die zunächst als einfacher Kalibrieransatz zur Streckenkorrektur dient.

6 2D-Positionsbestimmung

Auf der Basis des Experimentalsystems wurden 2D-Positionsbestimmungen mit Mobil- und Referenzstationen in einer horizontalen Ebene durch Magnetfeldmessungen zu drei Spulen durchgeführt. Dazu wurden die Spulen in einem lokalen Bezugssystem koordiniert und wie in Abb. 6

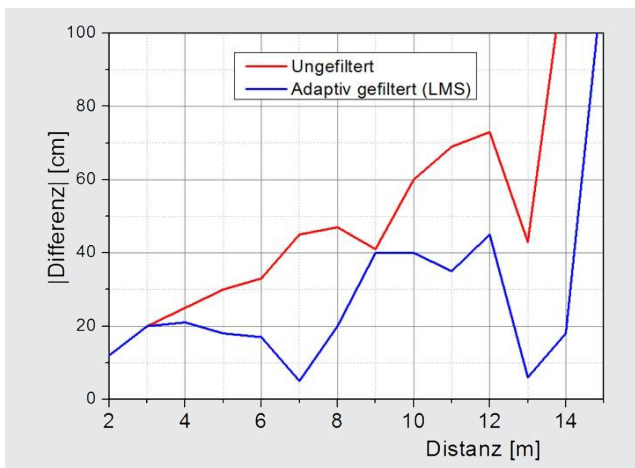


Abb. 5: Äußere Genauigkeit der adaptiv gefilterten Signale bei einer Referenzstation

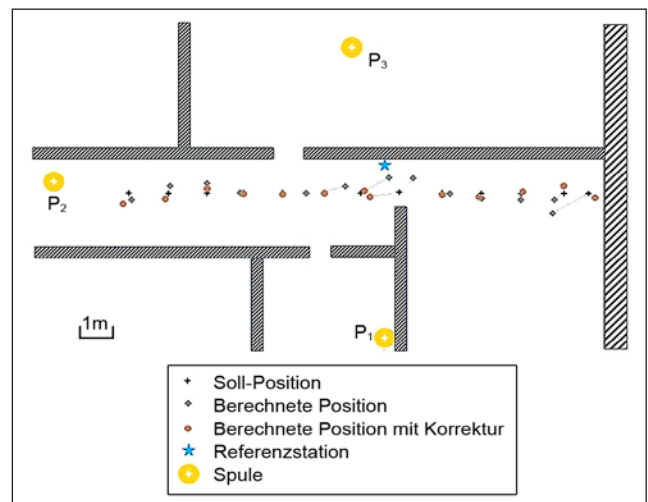


Abb. 6: Versuchsaufbau und Ergebnisse zur 2D-Positionsbestimmung

zu sehen in verschiedenen Räumen verteilt. Die Mobilstation wurde hier erneut auf verschiedenen Punkten auf einer Messungslinie platziert. Neben der Mobilstation wurde ein Referenzsensor für die adaptive Filterung an einem bekannten Punkt aufgestellt. In der Auswertung wurden die Positionen der Mobilstation durch einen Bogenschlag (vgl. Blankenbach und Willert 2009) sowohl mit den unkorrigierten als auch mit den unter Verwendung des einfachen Kalibrieransatzes korrigierten Distanzen berechnet und den Sollpositionen gegenübergestellt. Für das vorliegende Beispiel ergab sich aus den 2D-Positionsabweichungen eine äußere Genauigkeit im Bereich von ca. 10 cm für die adaptiv gefilterten und 50 cm für die ungefilterten Messungen.

7 Massenmarkt Indoor-Ortungsdienste auf Basis von MILPS

Ein Problem bei der Verwendung von Indoor-Positionierungssystemen in der Praxis stellt die fehlende Massenmarkttauglichkeit vieler existierender Systeme aufgrund der verwendeten Technologie bzw. (Spezial)Sensorik dar. Für MILPS muss die Mobilstation jedoch lediglich mit einem dreiachsigen Magnetfeldsensor ausgestattet sein, der in heutigen Smartphones bereits integriert ist. Zur Evaluierung von Smartphones als Mobilstation für MILPS wurden daher erste Tests sowohl mit dem iPhone (v3 & 4) (Abb. 7) als auch mit einem aktuellen Android-Gerät (Samsung Galaxy Nexus) durchgeführt.

Die Spulenfelder des Experimentalsystems konnten bei einer angelegten Stromstärke von 12 A bis zu einer Entfernung von ca. 6 m zuverlässig detektiert werden, wobei Positionsabweichungen von unter 15 cm erreichbar waren. Die reduzierte Reichweite gegenüber dem im Experi-

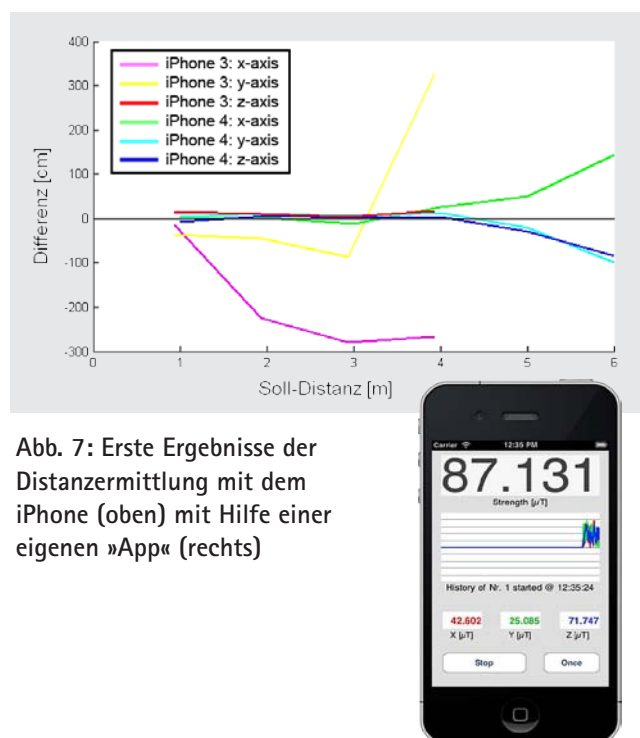


Abb. 7: Erste Ergebnisse der Distanzermittlung mit dem iPhone (oben) mit Hilfe einer eigenen »App« (rechts)

mentalsystem verwendeten Honeywell-Sensor lässt sich durch die geringere Auflösung des eingebetteten Sensors erklären.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Positionsbestimmung auf der Basis künstlich erzeugter Magnetfelder durch Distanzermittlung zwischen Spule und Sensor auch in schwierigen NLoS-Innenraumumgebungen möglich ist. Für die praktischen Versuche wurde ein Experimentalsystem auf der Basis äußerst preisgünstiger Spulen sowie kommerzieller Magnetfeldsensoren implementiert. Mit Methoden der digitalen Signalverarbeitung konnte der Einfluss von Interferenzfeldern minimiert und damit die Genauigkeit der Positionsschätzung deutlich verbessert werden. Für die 2D-Positionierung mit drei Magnetspulen lassen sich derzeit äußere Genauigkeiten von unter 0,5 m für mittlere Messvolumina erreichen. Mit Hilfe eines einfachen Kalibrieransatzes zur Streckenkorrektur konnte die Positionsabweichung sogar auf weniger als 0,1 m verbessert werden.

Die aktuellen Untersuchungen richten sich auf die 3D-Positionsbestimmung sowie die Vergrößerung der Reichweite des Systems u. a. durch Erhöhung des Spulenwindungsdurchmessers und der Stromstärke. Letzteres konnte bereits mit einer weiteren Spule erfolgreich umgesetzt werden, deren Signale bis zu einer Distanz von ca. 45 m im Gebäude detektierbar waren. Darüber hinaus wird die Verwendung des Systems für Massenmarktanwendungen durch Evaluierung von modernen Smartphones als Mobilstation untersucht und am Aufbau eines Frameworks zur Implementierung von standortbezogenen Innenraumanwendungen gearbeitet.

Dank

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projektes unter dem Kennzeichen BL 1092/1-1 (www.ilps.tu-darmstadt.de).

Literatur

- Ascension Corporation (2012): Homepage, www.ascension-tech.com, letzter Zugriff 8/2012.
- Blankenbach J., Willert V.: Robuster Räumlicher Bogenschritt – Ein Ansatz zur robusten Positionsberechnung in Indoor-Szenarien. AVN, Heft 8–9/2009, S. 320–327.
- Blankenbach J., Norrdine A.: Positionierung innerhalb von Gebäuden auf Basis künstlich erzeugter Magnetfelder. AVN, Heft 07/2010, S. 264–271.
- Blankenbach J., Norrdine A.: Position Estimation Using Artificial Generated Magnetic Fields. Proc. of the 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2010.
- Blankenbach J., Norrdine A., Hellmers H.: Adaptive Signal Processing for a Magnetic Indoor Positioning System. Proc. of the 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2011.

- Callmer J., Skoglund M., Gustafsson F.: Silent localization of underwater sensors using magnetometers. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010.
- Chao Hu, Meng M.Q.-H., Mandal M., Xiaona Wang: 3-Axis Magnetic Sensor Array System for Tracking Magnet's Position and Orientation, Proc. Of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006.
- Hofbauer M., Moschytz G.: Adaptive Filter: eine Einführung in die Theorie mit Aufgaben und MATLAB-Simulationen, Springer-Verlag, 2000.
- Kuipers G.: Object tracking and orientation determination means, system and process, U.S. Patent Nr. 3868565, 1975.
- Lehner G.: Elektromagnetische Feldtheorie für Ingenieure und Physiker. 5. Auflage. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York, 2006.
- Polhemus Corporation: Homepage, www.polhemus.com, letzter Zugriff 8/2012.
- Prigge E.A.: A positioning system with no line-of-sight restrictions for cluttered environments, Dissertation, Stanford University, 2012.
- Raab F.H., Blood E.B., Steiner T.O., Jones H.R.: Magnetic Position and Orientation Tracking System, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-15, No. 5, pp. 709–718, 1979.
- Widrow B.: Adaptive noise cancelling: Principles and applications, Proceedings of the IEEE, vol. 63, Issue 12, pp. 1692–1716, 1975.

Anschrift der Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach
Dr.-Ing. Abdelmoumen Norrdine
RWTH Aachen University, Geodätisches Institut
Templergraben 55, 52062 Aachen
blankenbach@gia.rwth-aachen.de
norrdine@gia.rwth-aachen.de