Optimierung von Geosensornetzwerken

Zusammenfassung

Die fortschreitende Entwicklung in der Sensortechnologie ermöglicht den Aufbau mobiler Geosensornetzwerke; wodurch die Erfassung raumzeitvarianter Phänomene revolutioniert wird. Die Frage des effizienten Einsatzes von Geosensornetzwerken und ihre kontinuierliche Optimierung stellt ein aufkommendes Forschungsfeld der Geoinformatik dar. In diesem Beitrag wird versucht eine Klassifizierung bestehender Ansätze aufzubauen und deren Vor- und Nachteile gegenüber zustellen.

Abstract

The recent progress in sensor technology enables the development of mobile geosensor networks, which revolutionizes the way of observing spatiotemporal phenomena. The question of efficient use of geosensor networks and their continuous optimization is an emerging research field of Geoinformatics. This paper attempts to build up a classification of existing approaches and to compare them by listing their advantages and disadvantages.

AUTOR

Walkowski, A.C.

Keywords: Geosensornetzwerk, raumzeitliche Datenerfassung, Messnetzoptimierung

1 Einleitung

In Anlehnung an den MIT Technology Review (2003) können Geosensornetzwerke als eine von zehn Technologien angesehen werden, die das Potential besitzen die Welt zu verändern. Der Aufbau mobiler Geosensornetzwerke wird durch die fortschreitende Entwicklung im Bereich der Sensortechnologie ermöglicht. Ihre Anwendung stellt ein Instrument dar, welches die Erfassung raumzeitvarianter Phänomene in einer ungeahnten zeitlichen und räumlichen Auflösung erlaubt (Warneke 2006:1). Die Optimierung von GSN stellt ein aufkommendes Forschungsfeld der Geoinformatik dar. Ziel des vorliegenden Beitrags ist es einen Überblick über das Themenfeld der Geosensornetzwerke und deren Optimierung zu geben.

2 Definition des Begriffs „Geosensornetzwerk“

Ein Sensor stellt einen Wandler dar, welcher physikalische, chemische, oder elektronische Größen in ein elektrisches Signal umwandelt. Der Zusammenhang zwischen dem zu observierenden Phänomen und dem durch den Sensor generierten Signal wird durch die *Sensortransferfunktion* beschrieben (González-Millán & Sanchis-Peris 2006:1). Ohne ihre Kenntnis ist eine Auswertung des generierten Signals nicht möglich und die Reproduzierbarkeit von Messungen nicht gegeben.

In Anlehnung an Botts (2007:34f.) wird eine Klassifizierung der Sensoren nach *Art des Messvorganges und Mobilität des Sensors* vorgenommen. In Abhängigkeit der Mobilität des Sensors wird zwischen stationären und mobilen Sensoren unterschieden. Im Gegensatz zu *stationären Sensoren*, die fest an einem Standort installiert sind, können *mobile Sensoren* sich im Untersuchungsgebiet bewegen. Hierbei kann zwischen *automobilen* (autonomen) Sensoren und *allomobilen* (getragenen) Sensoren, die durch Agenten getragen oder durch Strömungen passiv transportiert werden, differenziert werden.

Nach der Art des Messvorgangs können Sensoren in *Fernerkundungssensoren* (remote Sensoren), die Charakteristika von entfernten Objekten erfassen, ohne dass sie in direktem Kontakt mit dem Objekt stehen, und *in-situ Sensoren* eingeteilt werden. Letztere erfassen das zu observierende Phänomen durch direkten Kontakt mit dem Phänomen an dem Ort, an dem sie installiert sind.

Zur Erfassung der räumlichen Dimension eines Phänomens bedarf es – vor allem unter Verwendung von in-situ Sensoren – der Installation der Sensoren in einem räumlich verteilten *Sensornetzwerk*. Konventionelle Sensornetzwerke verfügen über eine kabelgebundene Kommunikationsinfrastruktur sowie eine permanente Energieversorgung.

Durch die Weiterentwicklung der Sensorik – insbesondere der Evolution der micro-electro-mechanical-systems (MEMS) – wird die Miniaturisierung der Sensoren und die Konstruktion von Sensorknoten ermöglicht. *Sensorknoten* – bestehend aus Sensor, (drahtloser) Kommunikationseinheit, Speicher, Prozessor und Energieversorgung (Abbildung 1) – erlauben den Aufbau von verteilten Sensornetzwerken mit einer zuvor unbekannten Netzwerkdichte (Warneke 2006:1).

Iyengar, et al. (2004:483) definieren den Begriff ***d**istributed **s**ensor **n**etwork* (DSN) als Sammlung einer großen Anzahl heterogener intelligenter Sensoren, die räumlich verteilt sind und durch ein Kommunikationsnetzwerk verbunden sind. Ein DSN besteht somit aus räumlich verteilten Sensorknoten. Andere Autoren – wie beispielsweise Römer & Mattern (2004:54f.) – stellen die drahtlose Kommunikation in den Vordergrund und sprechen von ***w**ireless **s**ensor **n**etworks* (WSN). Aus Sicht des Verfassers ist die Unterscheidung nach dem Kommunikationsmedium nicht relevant; zumal die Kommunikation in DSN wegen der hohen Kosten für die Verkabelung (Karl & Willig (2005:2) in der Regel auch drahtlos erfolgt. Des Weiteren ist eine drahtlose Kommunikation für den Aufbau mobiler Sensornetzwerke unumgänglich (Karl & Willig 2005:2). Deshalb werden die Begriffe DSN und WSN als Synonyme betrachtet. Das Einsatzspektrum von DSN reicht von der Gebäudeautomation über medizinische Anwendungen hin zur Steuerung von Produktionsprozessen (Akyildiz, et al. 2002:395ff.). Typisch für die genannten Einsatzfelder von DSN ist, dass die Sensorknoten nicht explizit georeferenziert sind. Beispielsweise ist bei der Steuerung und Überwachung von Produktionsprozessen die Position des Sensorknotens aus der Topologie der Produktionsabläufe bekannt.

Die Georeferenzierung der Sensorknoten führt zur Definition des Geosensornetzwerks. Nittel & Stefanidis (2005:2) definieren ein GSN als ein „sensor network

that monitors phenomena in geographic space, and in which the geospatial content of the informations collected, aggregated, analyzed, and monitored by a sensor network is fundamental.“ Aus Sicht des Verfassers wird aus dieser Definition nicht ersichtlich, wieso ein räumlich verteiltes DSN zur Überwachung von Produktionsprozessen – bei dem die Georeferenzierung der Sensorknoten fehlt – kein GSN darstellt. Deshalb wird in diesem Beitrag ein ***Geosensornetzwerk*** (GSN) als ein aus georeferenzierten Sensorknoten bestehendes spezialisiertes Sensornetzwerk definiert (Abbildung 1). Im Gegensatz zu den zwar räumlich verteilten Sensorknoten eines DSN hat ein GSN aufgrund der georeferenzierten Sensorknoten (Geosensorknoten) einen expliziten Raumbezug. Die *Geosensorknoten* stellen wegen ihrer Georeferenzierung, die auf verschiedene Arten realisiert sein kann – wie z.B. durch GPS-Sensoren oder manuelles Einmessen stationärer Sensoren – eine Spezialisierung konventioneller Sensorknoten dar (Abbildung 1).

Der Begriff des Sensornetzwerks kann nicht mit dem Begriff „Sensor Web“ gleichgesetzt werden; vielmehr finden sich in der Literatur zwei Bedeutungen. Geprägt wurde der Begriff Mitte der 1990 am Jet Propulsion Laboratory (JPL) der NASA (Delin, et al. 2005). Als Sensor Web wurde eine Form von WSN bezeichnet, die dem Nutzer gegenüber als autonomes Makroinstrument erscheinen und intern die Aufgaben kollaborativ lösen (Delin 2006). Dieser hardware-technischen Sicht steht die geoinformatische Sichtweise gegenüber. Laut Sherwood & Chien (2007:2) ist Sensor Web „a coordinated observation infrastructure composed of a distributed collection of resources that can collectively behave as a single, autonomous, taskable, dynamically adaptive and reconfigurable observing system that provides raw and processed data, along with associated meta-data, via a set of standards-based service-oriented interfaces.” Hier liegt der Schwerpunkt auf einer dienstebasierten interoperablen Architektur für die Steuerung von Sensoren und den Zugriff auf Sensordaten. Dies entspricht den Bestrebungen der **S**ensor **W**eb **E**nablement (SWE)-Initiative des **O**pen **G**eospatial **C**onsortium (OGC) (Botts, et al. 2006:4).

3 Geosensornetzwerk-Optimierung

Beim Aufbau von Geosensornetzwerken gilt es ein Optimum zwischen bestmöglicher Erfassung – und somit Repräsentation – des Phänomens und minimalem Ressourcenaufwand zu finden (Iyengar, Tandon, Wu, Cho, Rao & Vaishnavi 2004:485). Die Erfassung eines Phänomens hängt von der Netzwerkkonstellation des GSN ab. Traditionelle Geosensornetzwerke werden auf der Grundlage standardisierter Verfahren geplant; die Repräsentativität der Messungen ist hierbei von großer Relevanz. Die Netzwerkkonstellation stationärer GSN ist durch die deployment-Strategie – nach der die Geosensorknoten installiert werden – bestimmt. Eine Optimierung der Netzwerkkonstellation erfolgt bei stationären GSN nur selten und ist meistens – aufgrund des Ziels der Kosteneinsparung – mit einer Reduktion der Netzwerkdichte verbunden (LAWA 2000:1ff.). Im Folgenden wird unter *GSN-Optimierung* nicht die Reduktion der Netzwerkkonstellation zum Zwecke der Kostenreduktion, sondern die Rekonfiguration (Veränderung) der Netzwerkkonstellation verstanden. Da bei ▶

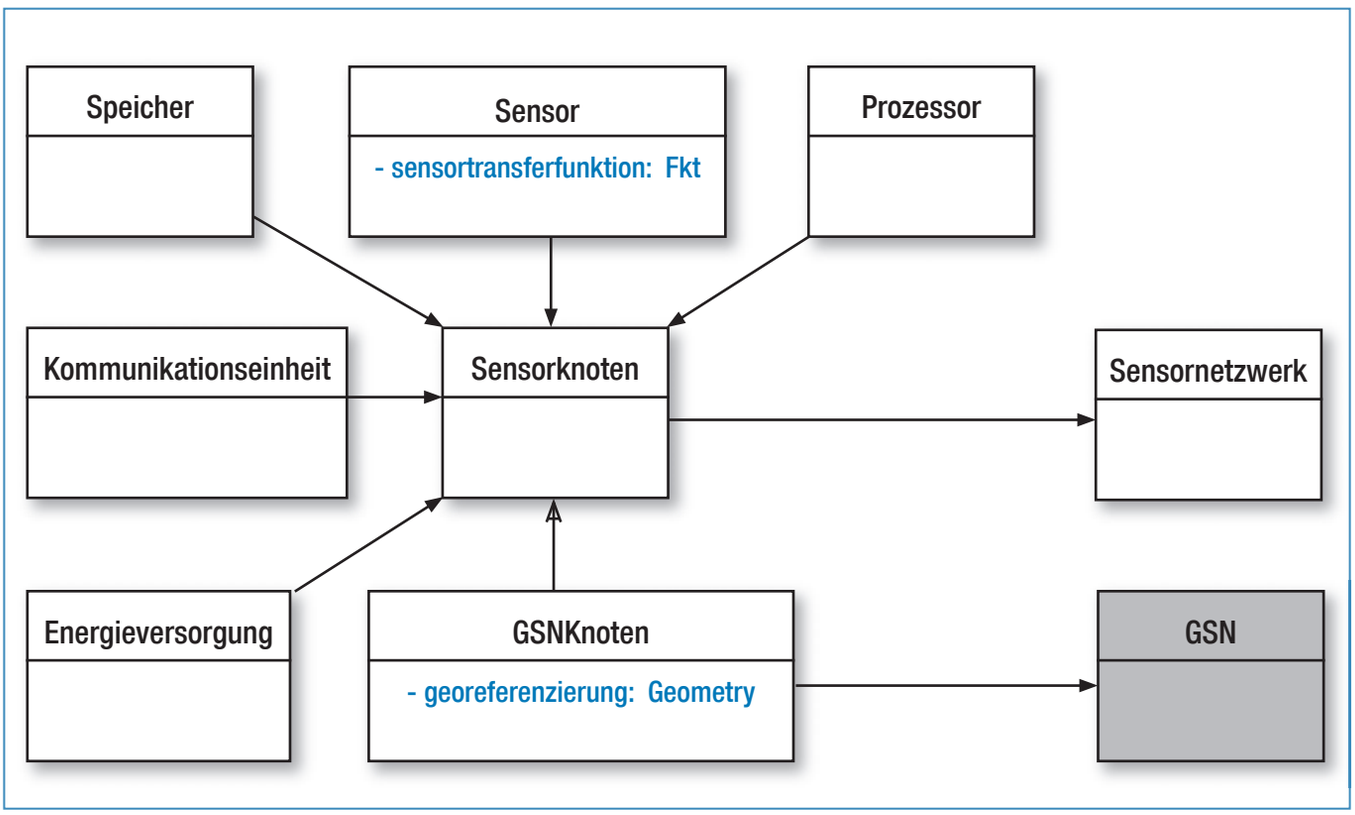

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Komponenten eines Geosensornetzwerks.

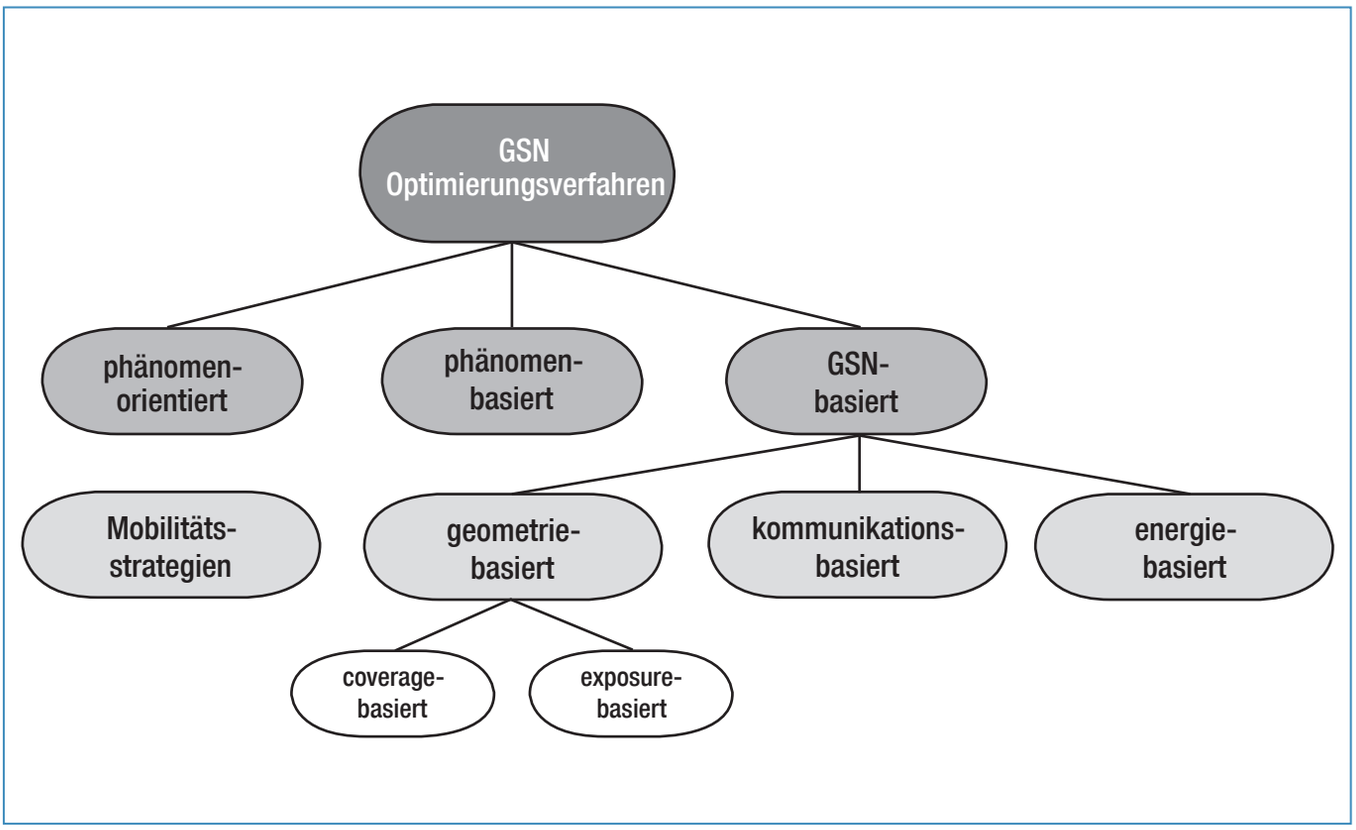

Abbildung 2: Klassifizierung bestehender Optimierungsverfahren für GSN.

mobilen GSN die Netzwerkkonstellation kontinuierlich verändert werden kann, hängt sie nur in der Anfangsphase von der deployment-Strategie ab.

Die im Folgenden vorgestellten Verfahren können in drei Klassen eingeteilt werden (Abbildung 2): Bei den in Abschnitt 3.1 vorgestellten *GSN-basierten Ansätzen* wird die Netzwerkkonstellation auf der Grundlage ausgewählter Charakteristika des GSN optimiert. Sowohl bei den phänomen-orientierten Verfahren (Abschnitt 3.2) als auch bei den phänomen-basierten Verfahren (Abschnitt 3.3) wird die Netzwerkkonstellation basierend auf Eigenschaften des Phänomens angepasst. Im Unterschied zu den *phänomen-basierten Verfahren* – bei denen die Netzwerkkonstellation basierend auf den Charakteristika des Phänomens berechnet wird – wird die Netzwerkkonstellation der *phänomen-orientierten Verfahren* durch eine Mobilitätsstrategie bestimmt. Die Mobilitätsstrategie gibt unter Einbeziehung der lokalen Ausprägung des Phänomens als auch anderer Parameter die Bewegungsrichtung des Geosensorknotens vor.

3.1 GSN-basierte Ansätze

Unter der Klasse der GSN-basierten Ansätze werden jene Verfahren der GSN-Optimierung zusammengefasst, welche die Netzwerkkonstellation anhand ausgewählter Charakteristika des GSN verändern. Im Detail kann zwischen folgenden Ansätzen unterschieden werden:

- *Geometrie-basierte Ansätze* – stellen die für die Erfassung des observierten Phänomens erforderliche geometrische Anordnung der Geosensoren in den Mittelpunkt der Optimierung, ohne jedoch die Ausprägung des Phänomens zu berücksichtigen.
- *Kommunikations-basiert Ansätze* – fokussieren auf die für die Kommunikation erforderliche Anordnung der Geosensorknoten im Untersuchungsgebiet.
- *Energie-basiert Ansätze* – stellen die Energiebeschränkung der meisten mobilen GSN in den Mittelpunkt der Optimierung.

Zunächst werden in Abschnitt 3.1.1 die geometrie-basierten Ansätze vorgestellt. Anschließend wird in Abschnitt 3.1.2 auf kommunikations-basierte und in Abschnitt 3.1.3 auf energie-basierte Ansätze eingegangen.

3.1.1 Geometrie-basierte Ansätze

Die in diesem Abschnitt erörterten Verfahren organisieren die Geosensorknoten basierend auf geometrischen Überlegungen, ohne die Ausprägung des Phänomens – das heißt die Messwerte – zu berücksichtigen. Obwohl eng miteinander verknüpft, soll zwischen coverage- und exposure-basierten Ansätzen unterschieden werden.

Die Abdeckung *(coverage)* eines GSN beschreibt einen Qualitätsparameter, der angibt, wie gut ein Untersuchungsgebiet von Sensoren abgedeckt wird (Meguerdichian, et al. 2001:1380). Schwachstellen in der Abdeckung bedeuten, dass Ereignisse im Untersuchungsgebiet auftreten können, jedoch nicht durch das GSN erfasst werden. Unter der Annahme eines polygonalen Untersuchungsgebietes kann gemäß des Kunstgalerie-Theorems (O'Rourke 1987) die für eine gewünschte Abdeckung benötigte Anzahl von Geosensorknoten berechnet werden. Die notwendige und hinreichende Anzahl mobile Geosensorknoten für ein *n*-eckiges Po-

lygon beträgt gemäß des Kunstgalerie-Theorems $^{n}/_{4}$ (O'Rourke 1987:82). Im Folgenden wird exemplarisch eine GSN spezifische Lösung vorgestellt.

Zou & Chakrabarty 2003) stellen einen sogenannten **V***irtual* **F***orce* **A***lgorithmus* (VFA) vor, der in einer einmaligen Repositionierungsphase nach einer zufälligen Verteilung der Geosensorknoten eine optimale Abdeckung gewährleistet. Geosensorknoten, die gemäß eines vorher definierten Grenzwerts zu nah beieinander liegen, stoßen sich ab, um zu starke Clusterbildung zu vermeiden. Hindernisse wirken ebenfalls abstoßend, um Kollisionen zu umgehen. Zu weit von einander entfernte Geosensorknoten ziehen sich an, um so zu einer möglichst gleichmäßigen Verteilung der Geosensorknoten im Untersuchungsgebiet zu gelangen.

Die Gefährdung *(exposure)*, auf dem Weg durch das Untersuchungsgebiet vom GSN entdeckt zu werden stellt einen Qualitätsparameter dar, der von der geometrischen Anordnung der Geosensorknoten im Untersuchungsgebiet abhängt (Megerina, et al. 2002:443). Die Gefährdung, an einem Punkt im Untersuchungsgebiet vom GSN entdeckt zu werden, hängt von der Sensitivität der Geosensorknoten ab. Die Sensitivität wird als proportional zur inversen Distanz zwischen dem aufzuspürendem Objekt und dem Geosensorknoten angenommen (Veltri, et al. 2003:41). Wird ein Punkt im Untersuchungsgebiet von mehr als einem Geosensorknoten überwacht, wird die Gefährdung an dem Punkt entweder als Summe aller Gefährdungswerte der einzelnen Geosensorknoten oder aber als Gefährdungswert des nächstgelegenen Geosensorknotens definiert (Megerina, Koushanfar, Qu, Veltri & Potkonjak 2002:446 und Veltri, Qu, Huang & Potkonjak 2003:41).

Durch die Berechnung des *minimalen Gefährdungswegs* (minimal exposure path) werden die Schwachstellen im GSN erkannt und durch Hinzufügen von Geosensorknoten oder Rekonfiguration der Netzwerkkonstellation kann das GSN optimiert werden. Meguerdichian, Koushanfar, Potkonjak & Srivastava (2001:1383) benutzen den Begriff des „maximal breach path"; in Anlehnung an Megerina, Koushanfar, Qu, Veltri & Potkonjak (2002:444) wird dies als Synonym für minimum exposure path angesehen. Meguerdichian, Koushanfar, Potkonjak & Srivastava (2001:1383) schlagen vor, die Voronoi-Polygone um die Geosensorknoten zu berechnen, deren Kanten in eine Graphenrepräsentation zu überführen und in dem gewichteten Graphen den minimalen Gefährdungsweg zwischen zwei gegebenen Punkten zu berechnen. Als Gewicht wird jeder Kante die minimale inverse Distanz zum nächstgelegenen Geosensorknoten – dies entspricht der Gefahr vom Geosensorknoten während des Traversierens dieser Kante entdeckt zu werden – zugeordnet. Den minimalen Gefährdungsweg auf den Kanten der Voronoi-Polygone zu suchen, liegt die Erkenntnis zugrunde, dass so der maximal mögliche Abstand zu den Geosensorknoten eingehalten werden kann.

Die Kante im minimalen Gefährdungsweg mit dem minimalen Gewicht stellt den Schwachpunkt des GSN dar. Durch das Hinzufügen eines weiteren Geosensorknotens kann die Gefährdung auf dem Weg durch das Untersuchungsgebiet erhöht und somit die Qualität des GSN verbessert werden (Meguerdichian, Koushanfar, Potkonjak & Srivastava 2001:1385).

3.1.2 Kommunikations-basierter Ansatz

Die Gewährleistung der Kommunikation innerhalb eines GSN ist für die Funktionsfähigkeit des GSN von zentraler Bedeutung. Voraussetzung, um Messwerte aus dem GSN über die Basisstation an den Nutzer transportieren und das GSN steuern zu können, ist ein Kommunikationsnetzwerk, welches im Fall von GSN durch die Geosensorknoten selbst gebildet wird. Kommunikations-basierte Ansätze optimieren das GSN derart, dass der aus den Geosensorknoten gebildete Graph unter Berücksichtigung der Kommunikationsfähigkeit der einzelnen Geosensorknoten zusammenhängend ist und somit Konnektivität des Kommunikationsnetzwerkes gegeben ist. Konnektivität – oder auch Zusammenhang – beschreibt die minimale Anzahl von Knoten, die aus einem Graphen entfernt werden müssen, um den Graphen zu trennen (Diestel 2006:61).

Unter der Annahme einer isotropen Kommunikationsreichweite kann der Kommunikationsbereich eines Sensors – analog zum Observierungsbereich – als Kreis modelliert werden. Im Gegensatz zur Abdeckung muss für die Konnektivität nicht jeder Punkt im Untersuchungsgebiet durch einen Geosensorknoten beobachtet werden; es reicht aus, wenn jeder Geosensorknoten im Kommunikationsbereich mindestens eines anderen Geosensorknotens liegt (Wang, et al. 2003:30).

Wenn die Kommunikationsreichweite (R_k) der Geosensorknoten mindestens dem Doppelten der Sensorreichweite (R_s) entspricht, ist Konnektivität immer dann gegeben, wenn das Untersuchungsgebiet vollständig abgedeckt ist (Wang, Xing, Zhang, Lu, Pless & Gill 2003:30). Sofern $R_k \geq R_s$ gilt, können die in Abschnitt 3.1.1 erörterten coverage-basierten Ansätze zur kommunikations-basierten Optimierung eines GSN benutzt werden.

3.1.3 Energie-basierter Ansatz

Die Energieversorgung von Geosensorknoten erfolgt in der Regel über Batterien. Da ein Austausch nach der Installation des GSN unpraktikabel ist, stellt Energie eine beschränkte Ressource dar, welche die Lebensdauer eines Geosensorknotens als auch die Funktionsdauer des gesamten GSN bestimmt. (Saputra, et al. 2004:697)

Das Ziel energie-basierter Ansätze ist es, die Geosensorknoten in der Art anzuordnen, dass der Energieverbrauch minimiert wird. Da die drahtlose Kommunikation den größten Energieverbrauch hat, konzentrieren sich die energie-basierten Ansätze stark auf die Optimierung der Kommunikation (Raghunathan, et al. 2002:45 und Saputra, Vijaykrishnan, Kandemir, Brooks & Irwin 2004:697). Im Unterschied zu den kommunikations-basierten Ansätzen, deren Ziel die Sicherstellung der Kommunikation ist, steht der Energieverbrauch im Mittelpunkt der energie-basierten Ansätze. Eine Ausnahme stellt der Ansatz des *Energiesammelns* (energy harvesting) von Rahimi, et al. (2003) dar. Hierbei sammeln mobile Geosensorknoten über Solarzellen Energie, mit der die stationären Geosensorknoten versorgt werden.

Siqueira, et al. (2007) stellen einen sogenannten *coverage area management service* vor. Nach der Installation des GSN wird durch die *Dichtekontrolloperation* (density control function) die Topologie des GSN berechnet. Dadurch werden all jene Geosensorknoten ausgeschaltet, die weder für die Aufrechterhaltung der Konnektivität noch für die Abdeckung des Untersuchungsgebiets benötigt werden. Dabei wird ein stationäres GSN ▶

angenommen bei dem eine Vielzahl von Geosensorknoten redundant ist, weil das Untersuchungsgebiet bereits vollständig abgedeckt ist.

Ferner werden Geosensorknoten proportional zur verfügbaren Energie bevorzugt. An die Initialisierungsphase schließt sich die operationale Phase an, in der kontinuierlich eine *Fehlerüberwachung* durchgeführt wird. Werden Fehler – wie z.B. Verlust von Datenpaketen oder der vollständige Verbrauch der Energie in der nächsten Überwachungsperiode – erkannt, wird die Dichtekontrollfunktion aufgerufen und die Topologie des GSN neu berechnet. Dabei werden jene Geosensorknoten wieder eingeschaltet, die Abdeckung und Konnektivität unter Ausnutzung der maximal verfügbaren Energie der Geosensorknoten gewährleisten. Unter Nutzung des coverage area management service wird sowohl die Funktionsdauer als auch die Abdeckung verbessert (Siqueira, Ruiz, Loureiro & Nogueira 2007:28f.).

3.2 Phänomen-orientierter Ansätze

Bei den phänomen-orientierten Ansätzen wird die Netzwerkkonstellation durch eine Mobilitätsstrategie bestimmt, die unter Berücksichtigung der lokalen Ausprägung des Phänomens als auch anderer Parameter die Bewegungsrichtung des Geosensorknotens vorgibt. Im Gegensatz zu den GSN-basierten Ansätzen orientiert sich die durch die Mobilitätsstrategie vorgegebene Bewegungsrichtung an der aktuellen Ausprägung des Phänomens.

Sliwinski & Simonis (2005:181) beschreiben unter anderem eine *autonome Mobilitätsstrategie*, bei welcher ein Geosensorknoten für den Zeitraum an einem Ort verweilt, in dem er das Phänomen dort erfasst. Andernfalls bewegt er sich zufällig durch den Raum.

Aufbauend auf den Arbeiten von Butler & Rus (2003) und Sliwinski & Simonis (2005) beschreibt Jirka (2006:40ff.) eine Mobilitätsstrategie *(Bewegung zu Ereignissen)*, welche die Geosensorknoten zu im Untersuchungsgebiet aufgetretenen Ereignissen – wie beispielsweise durch andere Geosensorknoten detektierte Grenzwertüberschreitungen – hinführt. Für den trivialen Fall, in dem es nur eine Region im Untersuchungsgebiet gibt, zu der die Geosensorknoten geführt werden sollen, wird der Mittelwert der Positionen gebildet, an denen die Geosensorknoten das Ereignis festgestellt haben. Dies führt dazu, dass die Geosensorknoten sich in das Zentrum dieser Region bewegen. Für den komplexeren Fall, bei dem es mehrere Regionen gibt, zu denen Geosensorknoten geführt werden sollen, muss ein anderer Ansatz gewählt werden. Aufgrund der Mittelwertbildung sammelten sich die Geosensorknoten sonst in der Mitte zwischen den Regionen, zu denen sie geführt werden sollten (Jirka 2006:41). In Anlehnung an Butler & Rus (2003:36) berechnet Jirka (2006:42) virtuelle Anziehungskräfte, die von der Entfernung zwischen Ereignis und zu bewegendem Geosensorknoten abhängen. Die Anziehungskräfte leiten die Geosensorknoten zu den am nächsten gelegenen Regionen und verhindern eine Clusterbildung zwischen den Regionen. Wird das Phänomen, nach dem sich die Geosensorknoten zu den Ereignissen bewegt haben, nicht mehr erfasst, führen die Geosensorknoten eine Distanzmaximierung aus, um sich möglichst gleichmäßig im Raum zu verteilen (Jirka 2006:51).

Örgen, et al. (2004) stellen eine Mobilitätsstrategie vor, bei der die Geosensorknoten lokale Minima oder Maxima des Phänomens aufspüren. Die Mobilitätsstrategie basiert auf dem Verhalten von Fischschwärmen, die auf der Suche nach Regionen mit hohem Nahrungsangebot dem Gradienten des Nährstoffgehaltes folgen. In Analogie wird das GSN als Schwarm aufgefasst und aus dem Messwerten des GSN ein Gradient berechnet, der die globale Bewegungsrichtung des GSN vorgibt (Örgen, Fiorelli & Leonard 2004:1293). Jeder Geosensorknoten bestimmt unter Einhaltung der globalen Bewegungsrichtung sein lokales Bewegungsmuster. Jirka (2006:43) bezeichnet diesen Typ Mobilitätsstrategie als Gradientenverfolgung; im Unterschied zu Örgen, Fiorelli & Leonard (2004) berechnet jeder Geosensorknoten isoliert eine Gradienten, dem er dann folgt.

3.3 Phänomen-basierter Ansatz

Die Klasse der phänomen-basierten Ansätze umfasst jene Verfahren der GSN-Optimierung, welche die Netzwerkkonstellation auf der Basis der Charakteristika des Phänomens bestimmen. Nach Literaturkenntnis des Verfassers liegt den phänomen-basierte Ansätzen der geostatistische Ansatz zugrunde; im Folgenden sollen exemplarisch einige Ansätze vorgestellt werden.

Bereits Gandin (1963:196ff.) argumentiert, dass bei der Optimierung von Geosensornetzwerken die stochastische Struktur des observierten Phänomens berücksichtigt werden muss. Auf der Grundlage der Standardabweichung des Schätzfehlers der objective analysis können Gebiete identifiziert werden, in denen die Geosensornetzwerkdichte erhöht werden muss – bzw. verringert werden kann – um das observierte Phänomen mit einer vorgegebenen Genauigkeit aus der Stichprobe schätzen zu können (Gandin 1963:202). Das von Gandin (1963) entwickelte Verfahren der objective analysis ist äquivalent zum von Matheron entwickelten Kriging-Verfahren. Überträgt man die Terminologie Gandins in die von Matheron, entspricht die quadrierte Standardabweichung der objective analysis der Kriging-Varianz. Die Kriging-Varianz hat die Eigenschaft, dass sie lediglich von den Semivariogrammwerten abhängt, die ihrerseits von der Konfiguration des Geosensornetzwerkes abhängen (McBratney & Webster 1981:333 und Gandin 1963:202). Da die lokalen Messwerte keinen Einfluss auf die Kriging-Varianz haben, kann sie als Maß für den Mangel an Information interpretiert und für die Optimierung von Geosensornetzwerken verwendet werden (Journel & Huijbregts 1997:308).

McBratney, et al. (1981:333) zeigen, dass der maximale Schätzfehler – unabhängig von der Dichte des GSN – genau dann minimiert wird, wenn die Geosensorknoten in Form einer gleichseitigen Dreiecks-Tesselation angeordnet werden. Unter Vorgabe eines maximal tolerablen Schätzfehlers kann auf der Basis der Kriging-Varianz die optimale Dichte des GSN bestimmt werden (McBratney, Webster & Burgess 1981:333). Modis & Papaodysseus (2006:500) geben eine Faustregel an, nach der die Entfernung zwischen den Geosensorknoten weniger als die halbe Aussageweite betragen soll.

Bei dem Ansatz von Pilger, et al. (2001) werden mittels geostatistischer Simulation weitere Realisationen des stochastischen Prozesses erzeugt. Aus diesen Realisationen wird die Variabilität des Phänomens mittels des Interquartilsabstandes berechnet. Der Ort mit dem größten Interquartilsabstand definiert den

nächsten zusätzlichen Beprobungsort.

Der Ansatz von Jiang, et al. (2007) zielt auf die Minimierung der Gebiete, in denen es zu Über- bzw. Unterschätzungen kommt. Das Phänomen wird als Summe eines großskaligen und eines kleinskaligen Anteils modelliert. Der großskalige Anteil wird über ein deterministisches Ausbreitungsmodell modelliert, welches mit Messwerten der aktuellen Konfiguration des GSN initialisiert wird. Der kleinskalige Anteil wird über unkonditionale geostatistische Simulation abgebildet. Jede Iteration der geostatistischen Simulation führt zu einer Werteoberfläche, die zusammen mit dem großskaligen Anteil (Trend-Komponente) als mögliche wahre Realisation des Phänomens angenommen wird. Ferner werden für jede Iteration Messwerte der Geosensorknoten aus den möglichen Realisationen generiert. Aus diesen simulierten Messwerten wird eine Werteoberfläche geschätzt und mit der wahren Realisation verglichen. Somit können Gebiete mit Über- bzw. Unterschreitungen identifiziert werden. Mithilfe eines simulated annealing Verfahrens werden die Geosensorknoten iterative verschoben, sodass die gewichtete Summe der Gebiete mit Über- bzw. Unterschätzungen (Kostenfunktion) minimiert wird.

4 Fazit

Als GSN-Optimierung wird nicht die Reduktion der Netzwerkkonstellation zum Zwecke der Kostenreduktion, sondern die Rekonfiguration der Netzwerkkonstellation definiert. Da bei mobilen GSN die Netzwerkkonstellation kontinuierlich verändert werden kann, hängt sie nur in der Anfangsphase von der deployment-Strategie ab. In Abhängigkeit der Berücksichtigung der Charakteristika des Phänomens und des GSN, sowie der Verwendung von Mobilitätsstrategien wird eine Klassifizierung von Optimierungsansätzen vorgenommen. Deren Vor- und Nachteile sollen im Folgenden kurz gegenüber gestellt werden.

Die für die geometrie-basierten Ansätze getroffene Annahme einer unbegrenzten Sensorreichweite erweist sich für in-situ Sensoren als problematisch. Eine pragmatische Lösung für in-situ Sensoren besteht darin, den Observierungsbereich eines in-situ Sensors als das Gebiet zu definieren, für das die Messung repräsentativ ist (Siqueira, Ruiz, Loureiro & Nogueira 2007:19). Ferner wird ein – hinsichtlich der Fähigkeiten einzelner Geosensorknoten – homogenes GSN angenommen; spezifische Charakteristika – wie beispielsweise raumzeitliche Wegpunkte – bleiben unberücksichtigt. Wang, Xing, Zhang, Lu, Pless & Gill (2003:30) zeigen, dass die coverage-basierten Ansätze zur kommunikations-basierten Optimierung eines GSN benutzt werden können, sofern die Kommunikationsreichweite der Geosensorknoten mindestens dem Doppeltem der Sensorreichweite entspricht. Im strikten Sinne ist diese Bedingung für in-situ Sensoren immer erfüllt; im pragmatischen Sinne ist sie genau dann erfüllt, wenn der Radius des Gebiets, für das die Messung repräsentativ ist, der halben Kommunikationsreichweite entspricht. Da die drahtlose Kommunikation den größten Energieverbrauch hat, konzentrieren sich die energie-basierten Ansätze stark auf die Optimierung der Kommunikation (Saputra, Vijaykrishnan, Kandemir, Brooks & Irwin 2004:697). Mit Ausnahme des Ansatzes von Rahimi, Shah, Sukhatme, Heidemann & Estrin (2003) – bei dem aktiv mit mobilen Geosensorknoten Energie gesammelt wird – erfolgt die Optimierung nicht durch Bewegung der Geosensorknoten. Stattdessen wird davon ausgegangen, dass die Anzahl der installierten Geosensorknoten größer ist als die, welche für die Abdeckung des Untersuchungsgebietes notwendig wäre. Somit kann die Netzwerkkonstellation durch Ein- bzw. Ausschalten von Geosensorknoten verändert werden. Es kann somit aber immer nur eine auf die initiale Positionierung der Geosensorknoten bezogene optimale Netzwerkkonstellation konfiguriert werden. Defizite der GSN-basierten Ansätze bestehen darin, dass das Phänomen bei der Optimierung unberücksichtigt bleibt. Insbesondere bei den kommunikations- und energie-basierten Ansätzen wird keine an die Charakteristika des Phänomens, sondern an die Geometrie des Untersuchungsgebietes angepasste Lösung erzielt. Im Gegensatz zu den GSN-basierten Ansätzen orientiert sich die durch die Mobilitätsstrategie vorgegebene Bewegungsrichtung der phänomen-orientierten Ansätze an der aktuellen Ausprägung des Phänomens. Ein Vorteil der autonomen Mobilitätsstrategie liegt darin, dass jeder Geosensorknoten autark handelt und somit keine Kommunikation zwischen den Geosensorknoten notwendig ist, außer für den Transport der Messwerte. Wird aus den Messwerten ein Modell des Phänomens berechnet, ist es fraglich, ob der Geosensorknoten effizient eingesetzt wird, wenn er, solange er das Phänomen detektiert, an dem Ort verweilt. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn Gebiete mit Grenzwertüberschreitungen erkannt werden sollen. Bestätigt das aus den Messwerten berechnete Modell, dass der Grenzwert mit einer Wahrscheinlichkeit nahe eins überschritten ist, kann der Geosensor nicht zur Verbesserung des Modells beitragen, wenn er weiterhin am Ort verweilt. Effizienter wäre es in den Gebieten, in denen die Wahrscheinlichkeit der Grenzwertüberschreibung beträgt, verstärkt Messungen vorzunehmen. Problematisch erweist sich der Ansatz der Gradientenverfolgung insofern, als dass nur lokale Minima bzw. Maxima aufgespürt werden. Ein Defizit des phänomen-orientierten Ansatzes bestehen darin, dass das Phänomen nur in Form der lokalen Ausprägung bei der Optimierung des GSN berücksichtigt wird und keine ganzheitliche Optimierung erfolgt. Im Unterschied zu den phänomen-orientierten Ansätzen erfolgt die Optimierung des GSN bei den phänomen-basierten Ansätzen auf der Basis der stochastischen Struktur des observierten Phänomens. Wie McBratney, Webster & Burgess (1981:333) zeigen, kann auf der Grundlage der Kriging-Varianz die optimale Dichte des GSN berechnet werden. Ein Verfahren zur kontinuierlichen Optimierung wird von McBratney, Webster & Burgess (1981) nicht vorgestellt; aufbauend auf ihren Überlegungen könnte die initiale Konfiguration des GSN bestimmt werden. Das Verfahren von Pilger, Costa & Koppe (2001) lässt die zeitliche Varianz des beobachteten Phänomens unberücksichtigt. Pilger, Costa & Koppe (2001) kritisieren die Kriging-Varianz als Maß für die Schätzgenauigkeit; stattdessen generieren sie mittels geostatistischer Simulation weitere Realisationen und bestimmen die Variabilität über den Interquartilsabstand. Heuvelink & Pebesma (2002) folgend wird die Kriging-Varianz als korrektes Maß der Schätzgenauigkeit aufgefasst und kann in Anlehnung an Journel & Huijbregts (1997:308) als Maß für Mangel an Information interpretiert werden. Somit kann unter Verzicht auf die rechnerisch aufwendige geostatistische Simulation das GSN unter Verwen- ▶

dung der Kriging-Varianz optimiert werden. Der Vorteil des von Jiang, de Bruin, Heuvelink & Twenhöfel (2007) vorgestellte Verfahrens liegt darin, dass die Geosensorknoten in jene Gebiete gesandt werden, in denen die Unsicherheit im aus dem Messwerten berechneten Modell des Phänomens am größten ist. Aufgrund des Mangels an räumlich als auch zeitlich ausreichend granularen Eingabedaten und Modellparametern erweisen sich deterministische Simulationsmodelle als problematisch (Kyriakidis & Journel 1999:652). Ferner schränkt die Nutzung deterministischer Simulationsmodelle das Optimierungsverfahren auf die durch die physikalischen und chemischen Gleichungen des Simulationsmodells beschriebenen Anwendungsdomänen ein. Jiang, de Bruin, Heuvelink & Twenhöfel (2007) zeigen, dass mittels eines räumlichen simulated annealing Ansatzes das GSN optimiert werden kann; spezielle Charakteristika einzelner Geosensorknoten – wie beispielsweise Mobilität order raumzeitliche Wegpunkte – bleiben jedoch unberücksichtigt.

Um das Potenzial der Geosensornetzwerke voll ausnutzen zu können, bedarf es Optimierungsverfahren, mit deren Hilfe die Netzwerkkonstellation angepasst wird, um das Phänomen bestmöglich unter minimalem Ressourcenaufwand zu erfassen (Teillet, et al. 2005:259). Den bestehenden Verfahren ist der Nachteil inhärent, dass sie nur einzelne Charakteristika berücksichtigen. Deshalb gilt es Verfahren zu entwickeln, die eine modellbasierte ganzheitliche Optimierung von GSN unter Berücksichtigung sowohl der Phänomen-Charakteristika als auch der Charakteristika des GSN ermöglichen. Um eine modellbasierten Ansatz zu realisieren, gilt es zunächst eine separate Modellierung von Phänomenen und GSN zu ermöglichen; anschließen werden Phänomen- und GSN-Modell kombiniert um alle Aspekte bei der Optimierung des GSN zu berücksichtigen.

5 Danksagung

Der vorliegende Beitrag entstand im Rahmen des Projektes „Service-orientierte ArchiteKturen zur Unterstützung von Netzwerken im Rahmen Oeffentlicher Sicherheit“ (www.soknos.de), welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Fördernummer 01|S07009A und der SAP AG gefördert wird. ■

AUTOR

Walkowski, A.C.
Institut für Geoinformatik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster,
Email: walkowski@uni-muenster.de

Literatur:

Akyildiz, I. F.; Su, W.; Sankarasubramaniam, Y.; Cayirci, E. (2002): Wireless sensor networks: a survey. In: Computer Networks, 38 (4) 393-422

Botts, M. (2007): OpenGIS Sensor Model Language (SensorML) Implementation Specification, Version 1.0.0. o.O. (=OGC, 07-00)

Botts, M.; Percivall, G.; Reed, C.; Davidson, J. (2006): OGC White Paper - OGC® Sensor Web Enablement: Overview And High Level Architecture. o.O. (=OGC, 06-050r2)

Butler, Z.; Rus, D. (2003): Event-based motion control for mobile-sensor networks. In: IEEE Pervasive Computing, 2 (4) 34-42

Delin, K. A. (2006): The Sensor Web: Distributed Sensing for Collective Action. Online unter: http://www.sensorsmag.com/sensors/article/articleDetail.jsp?id=358630 (abgerufen am: 18.08.2006)

Delin, K. A.; Jackson, S. P.; Johnson, D. W.; Burleigh, S. C.; Woodrow, R. R.; McAuley, J. M.; Dohm, J. M.; Ip, F.; Ferré, T. P. A.; Rucker, D. F.; Baker, V. R. (2005): Environmental Studies with the Sensor Web: Principles and Practice. In: Sensors, 5 103-117

Diestel, R. (32006): Graphentheorie. Heidelberg.

Gandin, L. S. (1963): Objective Analysis of Meteorological Fields. Leningrad (Translated by Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1965).

González-Millán, V.; Sanchis-Peris, E. (2006): Comparison of Data Processing Techniques in Sensor Networks. In: Mahgoub, I.; Ilyas, M. (Ed.) (2006): Smart Dust: sensor network applications, architecture, and design. Boca Raton, 1-20.

Heuvelink, G. B. M.; Pebesma, E. J. (2002): Is the ordinary kriging variance a proper measure of interpolation error? Proceedings of: 5th international symposium on spatial accuracy assessment in natural resources and environmental sciences, Melbourne.

Iyengar, S. S.; Tandon, A.; Wu, Q.; Cho, E.; Rao, N. S. V.; Vaishnavi, V. K. (2004): Deployment of Sensors: An Overview. In: Iyengar, S. S.; Brooks, R. R. (Ed.) (2004): Distributed Sensor Networks. Boca Raton, 483-504. (=Computer and Information Science Series, 2)

Jiang, Z.; de Bruin, S.; Heuvelink, G. B. M.; Twenhöfel, C. J. W. (2007): Optimization of mobile radioactivity monitoring networks. - 5th International symposium on spatial data quality. Enschede.

Jirka, S. (2006): Entwurf phänomenspezifischer Bewegungsstrategien für mobile Geosensoren. Münster (= unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Geoinformatik der Westfälischen Wilhelms-Universität zu Münster).

Journel, A. G.; Huijbregts, C. J. (71997): Mining Geostatistics. London.

Karl, H.; Willig, A. (2005): Protocols and architectures for wireless sensor networks. Chichester.

Kyriakidis, P. C.; Journel, A. G. (1999): Geostatistical Space–Time Models: A Review. In: Mathematical Geology, 31 (6) 651-684

LAWA (Ed.) (2000): Empfehlungen zu zur Optimierung des Grundwasserdienstes (quantitativ). Schwerin.

McBratney, A. B.; Webster, R. (1981): The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of regionalized variables - II. In: Computers & Geosciences, 7 (4) 335-365

McBratney, A. B.; Webster, R.; Burgess, T. M. (1981): The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of regionalized variables - I. In: Computers & Geosciences, 7 (4) 331-334

Megerina, S.; Koushanfar, F.; Qu, G.; Veltri, G.; Potkonjak, M. (2002): Exposure in Wireless Sensor Networks: Theory and Practical Soulutions. In: Wireless Networks, 8 443-454

Meguerdichian, S.; Koushanfar, F.; Potkonjak, M.; Srivastava, M. B. (2001): Coverage Problems in Wireless Ad-hoc Sensor Networks. Proceedings of: InfoCom 2001. 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, April 22-26, 2001, Anchorage.

MIT Technology Review (2003): 10 Emerging thechnologies that will change the world. Online unter: http://www.technologyreview.com/Infotech/13060/ (abgerufen am: 10.12.2007)

Modis, K.; Papaodysseus, K. (2006): Theoretical estimation of the critical sampling size for homogeneous ore bodies with small nugget effect. In: Mathematical Geology, 38 (8) 489-501

Nittel, S.; Stefanidis, A. (2005): GeoSensor Networks and Virtual GeoReality. In: Stefanidis, A.; Nittle, S. (Ed.) (2005): GeoSensor Networks. Boca Raton, 1-9.

O'Rourke, J. (1987): Art gallery theorems and algorithms. New York. (=The international series of monographs on computer science, 3)

Örgen, P.; Fiorelli, E.; Leonard, E. N. (2004): Cooperative Controll of Mobile Sensor Networks: Adaptive Fradient Climbing in a Distributed Environment. In: IEEE Transactions on Automatic Control, 49 (8) 1292-1302

Pilger, G. G.; Costa, J. F. C. L.; Koppe, J. C. (2001): Additional Samples: Where They Should Be Located. In: Natural Resources Research, 10 (3) 197-207

Raghunathan, V.; Schurgers, C.; Park, S.; Srivastava, M. B. (2002): Energy-Aware Wireless Microsensor Networks. In: IEEE Signal Processing Magazine, 19 40-50

Rahimi, M.; Shah, H.; Sukhatme, G.; Heidemann, J.; Estrin, D. (2003): Studying the Feasibility of Energy Harvesting in a Mobile Sensor Network. Proceedings of: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipai.

Römer, K.; Mattern, F. (2004): The Design Space of Wireless Sensor Networks. In: IEEE Wireless Comunications, 11 (6) 54-61

Saputra, H.; Vijaykrishnan, N.; Kandemir, M.; Brooks, R. R.; Irwin, M. J. (2004): An energy-aware approach for sensor data communication. In: Iyengar, S. S.; Brooks, R. R. (Ed.) (2004): Computer and Information Science Series. Boca Raton, 697-710. (=Computer and Information Science Series, 2)

Sherwood, R.; Chien, S. (2007): Sensor Web Technologies: A New Paradigm for Operations. Proceedings of: International Symposium on Reducing the Cost of Spacecraft Ground Systems and Operations (RCSGSO 2007), June 2007, Moscow.

Siqueira, I. G.; Ruiz, L. B.; Loureiro, A. A. F.; Nogueira, J. M. (2007): Coverage area management for wireless sensor networks. In: International Journal of Network Management, 17 (1) 17–31

Sliwinski, A.; Simonis, I. (2005): An Experiment on Geosensor Mobility Strategies in the Planar Space. Proceedings of: 8th AGILE Conference on GIScience, May 26-28 2005, Estoril, Portugal.

Teillet, P. M.; Chichagov, A.; Fedosejevs, G.; Gauthier, R. P.; Deschamps, A.; Pultz, T. J.; Ainsley, G.; Maloley, M.; Simard, F. (2005): In-Situ Sensorweb Prototype Demonstrations for Integrated Earth Sensing Applications. In: Stefanidis, A.; Nittle, S. (Ed.) (2005): GeoSensor Networks. Boca Raton, 259-265.

Veltri, G.; Qu, G.; Huang, Q.; Potkonjak, M. (2003): Minimal and Maximal Exposure Path Algorithms for Wireless Embedded Sensor Networks. Proceedings of: 1st international conference on Embedded networked sensor systems, Los Angeles.

Wang, X.; Xing, G.; Zhang, Y.; Lu, C.; Pless, R.; Gill, C. (2003): Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks. Proceedings of: 1st international Conference on Embedded Networked Sensor Systems, November 05-05 2003, Los Angeles.

Warneke, B. (2006): Miniaturizing Sensor Networks with MEMS. In: Mahgoub, I.; Ilyas, M. (Ed.) (2006): Smart Dust: sensor network applications, architecture, and design. Boca Raton, 1-19.

Zou, Y.; Chakrabarty, K. (2003): Sensor Deployment and Target Localization Based on Virtual Forces. Proceedings of: InfoCom 2003, Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. March 30-April 3, 2003, San Francisco.