

Energieeffizientes Routing in linearen Sensornetzwerken

Marco Zimmerling

Dieser Beitrag wurde bei den Informatik-Tagen 2008 als „Best Paper“ ausgezeichnet.

Einleitung

Drahtlose Sensornetzwerke bestehen aus einer Vielzahl von Mo-

dulen, welche mit Sensoren unterschiedlichen Typs ausgestattet sind. Zu den häufig eingesetzten Sensortypen zählen beispielsweise Temperatur- und Vibrationssensoren. Das breite Spektrum möglicher Anwendungen für Sensornetzwerke reicht von der automatischen Beleuchtungs- und Belüftungsregelung eines Einfamilienhauses über die Kontrolle des Kohlenmonoxidgehaltes in Raffinerien bis hin zur sensorbasierten Verkehrsüberwachung und -steuerung. Einige Anwendungen erfordern unter Umständen den Einsatz von mehreren tausend Sensormodulen. Diese sind hinsichtlich ihrer Energieressourcen, ihrer Rechenleistung und ihrer Speicherkapazität stark eingeschränkt. Aufgrund dieser spezifischen Merkmale sollten Protokolle und Algorithmen für Sensornetzwerke sehr gut skalieren, auf der Basis von lokal verfügbarem Wissen arbeiten und vor allem den Energieverbrauch der batteriebetriebenen Sensormodule so gering wie möglich halten [3]. Skalierbarkeit kann prinzipiell gewährleistet werden, indem Sensoren nur mit ihren unmittelbaren Nachbarn Informationen austauschen. Beispielsweise entscheidet ein lokal operierendes Routingprotokoll lediglich anhand der Position des Sensors, welcher momentan eine Nachricht vorhält, sowie den Positionen der umliegenden Sensoren, zu welchem dieser Nachbarn die Nachricht übertragen werden soll. Ist auch die Position des endgültigen Zielknotens bekannt, der als Schnittstelle zum Kontrollrechner oder dem Internet dienen kann, sind meist bessere Routing-

entscheidungen möglich. Wird allerdings durch ein Routingprotokoll vorausgesetzt, dass den Sensor-knoten derartige globale Informationen bekannt sind, geht dies unweigerlich zu Lasten der Lokalität und damit der Skalierbarkeit des Protokolls.

In der Vergangenheit wurde eine Vielzahl von Routingprotokollen für drahtlose Sensornetzwerke entwickelt [1]. Die überwiegende Mehrheit dieser Protokolle geht dabei von willkürlich verteilten Sensoren aus, welche sich letztlich zu einer maschenartigen Netzwerktopologie zusammenschließen. Für viele reale Anwendungen ist eine derartige allgemeine Topologie jedoch nur teilweise oder gar nicht zutreffend. Vielmehr bestimmen strukturelle Gegebenheiten, Messpunktverteilungen oder anwendungsspezifische Anforderungen die Positionen der Sensormodule. Soll zum Beispiel durch den Einsatz eines Sensornetzes der Zustand von Brücken [6] oder Ölpipelines [10] überwacht werden, so sind die eingesetzten Sensorknoten mehr oder weniger in einer Reihe angeordnet. Für theoretische Betrachtungen kann in diesen Fällen von einer linearen Netzwerktopologie ausgegangen werden.

Der vorliegende Artikel beschäftigt sich mit dem Problem des energieeffizienten Routings innerhalb linearer Sensornetzwerke. Die zu übertragenden Sensordaten werden durch eine beliebige Anzahl von Quellknoten generiert und müssen einem Ziel-

DOI 10.1007/s00287-008-0266-9
© Springer-Verlag 2008

Marco Zimmerling
Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik,
Institut für Systemarchitektur, Professur Rechnernetze,
01062 Dresden
E-Mail: marco@binaervarianz.de

Zusammenfassung

Der effektive Einsatz von Sensornetzwerken setzt eine besonders hohe Lebensdauer der batteriebetriebenen Sensormodule voraus. In der Vergangenheit wurden deshalb zahlreiche energieeffiziente Routingprotokolle für Sensornetze entwickelt. Die überwiegende Mehrheit dieser Protokolle geht dabei von einer maschenartigen Netzwerktopologie aus. Für bestimmte Anwendungen hingegen, wie beispielsweise der sensorbasierten Betriebsüberwachung von Ölpipelines, ist eine lineare Anordnung der Sensormodule inhärent. Aus diesem Grund stellt der vorliegende Artikel das „Minimum Energy Relay Routing“ (MERR)-Protokoll vor, ein speziell für lineare Sensornetze entwickeltes Routingprotokoll. Es werden konventionelle Routingstrategien besprochen und der Aufbau von Routingpfaden charakterisiert, entlang derer die aufzuwendende Energie minimal ist. Die Ergebnisse von stochastischen Untersuchungen und Simulation zeigen, dass MERR für praktisch relevante Sensoranordnungen nahe am Optimum arbeitet und im Vergleich zu existierenden Ansätzen erhebliche Energieeinsparungen erzielt.

knoten (Basisstation) zugeführt werden. Zunächst werden die verwendeten Systemmodelle eingeführt und zwei konventionelle Ansätze, direkte Datenübertragung und „Minimum Transmission Energy“ (MTE)-Routing, diskutiert. Anschließend wird aufgezeigt, wie optimale Routingpfade aufgebaut sind. Entlang dieser sind die aufzuwendenden Übertragungsenergien vom Quellknoten zur Basisstation minimal. Danach wird das Minimum Energy Relay Routing (MERR)-Protokoll besprochen [11]. MERR versucht, für jeden Sensorknoten einen Routingpfad zur Basisstation zu finden, den den jeweiligen Optimalpfad bestmöglich approximiert. Alle betrachteten Algorithmen werden sowohl auf Basis von stochastischen Untersuchungen als auch mittels Simulation evaluiert. Wie die Ergebnisse zeigen, ist es durch den Einsatz von MERR möglich, Energieeinsparungen von bis zu 80% im Vergleich zu MTE-Routing zu erreichen. Des Weiteren weicht der Energieverbrauch entlang der von MERR gewählten

Routingpfade weniger als 10% vom theoretischen Optimalwert ab.

Energie- und Verteilungsmodell

Um den Energieverbrauch eines Sensorknotens während der Datenübertragung zu quantifizieren, wird häufig das folgende Energiemodell [2] angewandt: Beim Senden eines Bitstroms der Rate r über eine Distanz d beträgt die aufzuwendende Leistung $P_{tx}(r, d) = r(\alpha_{tx} + \varepsilon d^\gamma)$. Das Empfangen eines solchen Bitstroms erfordert eine Leistungsaufnahme von $P_{rx}(r) = r\alpha_{rx}$. Die Parameter α_{tx} und α_{rx} stehen hier für den Energieverbrauch pro Bit im Sender- bzw. im Empfängerschaltkreis. Die im Übertragungsverstärker verbrauchte Energie ist durch den Parameter ε repräsentiert. Auf dem Weg vom Sender zum Empfänger erfährt das Signal eine Abschwächung, d.h. es geht elektromagnetische Leistung verloren. Diese Signalabschwächung wird auch als Pfadverlust bezeichnet und spiegelt sich im Energiemodell durch die *Freiraumdämpfung* γ wider. Ihr Wert bewegt sich, abhängig von den Übertragungsbedingungen, zwischen 2 (geringer Pfadverlust) und 6 (hoher Pfadverlust) [8]. Durch umfangreiche Messungen vor Ort ist eine recht genaue Bestimmung der Freiraumdämpfung möglich. Ist kein experimentell bestimmter Wert vorhanden, kann im Idealfall einer Sichtlinie zwischen Sender und Empfänger von einem Wert nahe 2 ausgegangen werden. Für die meisten realistischen Szenarien ist hingegen der Wert 4 eine sinnvolle Annahme.

Die konkrete Verteilung der Sensorknoten hat großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines Routingprotokolls und ist somit auch für dessen Beurteilung entscheidend. Ein Modell für die Sensorverteilung sollte flexibel genug sein, um ganz unterschiedliche Anwendungsszenarien abdecken zu können. Deshalb wird die Verteilung der Sensoren entlang eines linearen Pfades durch einen *eindimensionalen homogenen Poisson-Prozess* modelliert [7]. Die Punkte des Poisson-Prozesses werden hierbei als eine zufällige Folge von Sensorknoten interpretiert, die entlang einer Geraden angebracht sind. Eine solche Sensorverteilung ist durch die *Intensität* λ des Poisson-Prozesses charakterisiert. Die Intensität ist ein Maß für die Sensordichte, d.h. die durchschnittliche Anzahl von Sensoren pro Längeneinheit. Ihr Kehrwert gibt an, wie weit benachbarte Sensoren im Mittel voneinander entfernt sind.

Abstract

Effective application of wireless sensor networks requires several years of longevity of the battery-powered sensor nodes. Many energy-efficient routing protocols have been developed on this account, most of which consider sensor networks with arbitrary mesh topologies. For some applications, however, the assumption of a roughly linear deployment of the sensor modules is more appropriate as it becomes apparent in structure health monitoring of pipelines or bridges. This article introduces Minimum Energy Relay Routing (MERR), a novel approach to energy-efficient routing in sensor networks with linear topology. Conventional routing strategies are discussed, and the structure of routing paths with minimum energy consumption is illustrated. The results of stochastic analyses as well as simulations show that MERR reduces energy consumption significantly compared to existing approaches and performs close to the theoretical optimum for viable sensor distributions.

Konventionelle Ansätze und optimale Routingpfade

Um Daten innerhalb eines linearen Sensornetzes zur Basisstation zu übermitteln, sind zwei grundlegende Strategien möglich. Die einfachste Herangehensweise besteht darin, generierte Sensordaten direkt zur Basisstation zu senden. Dies ist jedoch aufgrund von Signaldämpfung und anderen Effekten nicht realisierbar, wenn sich zahlreiche Hindernisse aus Beton, Stahl oder ähnlichem Material zwischen Sensor und Basisstation befinden. Weiterhin kann bei einer zu großen Übertragungsdistanz ein fehler- und verlustfreier Empfang durch die Basisstation nicht mehr garantiert werden. Die direkte Übertragung kann dennoch am effektivsten sein, wenn die Entfernung zur Basisstation relativ kurz oder die zum Empfang von Daten benötigte Energie relativ groß ist.

Ein anderer Ansatz beruht darauf, bestimmte Sensorknoten auf dem Weg vom Quellsensor zur Basisstation als *Relais* zu nutzen. Relais empfangen Daten und übertragen diese unverändert weiter in Richtung der Basisstation. MTE-Routing basiert auf diesem *Multihop*-Prinzip und wählt Relais derart,

dass der Energieverbrauch des Übertragungsverstärkers (ϵd^γ) bei jedem Sendevorgang minimal ist [4]. Ein Sensor leitet empfangene Daten somit stets zum direkten Nachbarknoten weiter. Folglich werden alle Sensoren zwischen Quellsensor und Basisstation als Relais genutzt. Wenn große Distanzen zu überwinden sind, erzielt MTE-Routing beträchtliche Energieeinsparungen im Vergleich zur direkten Übertragung. Andererseits kann es auch dazu kommen, dass unnötig viel Energie beim häufigen (Zwischen-)Empfangen von Sensordaten verbraucht wird. Dies ist immer dann der Fall, wenn die Abstände zwischen benachbarten Sensormodulen relativ kurz sind.

Um Routingpfade zu beschreiben, entlang derer die verbrauchte Gesamtenergie minimal ist, wird im Folgenden von einem Sensor ausgegangen, der sich in einer Entfernung D von der Basisstation befindet. Für diesen Sensor ist die direkte Datenübertragung zur Basisstation optimal, wenn D kleiner oder gleich der Schwellwertdistanz $\alpha/(\epsilon(1 - 2^{1-\gamma}))$ ist. Andernfalls sollten $(K_{\text{opt}} - 1)$ gleichweit voneinander entfernte (äquidistante) Relais ausgewählt werden, welche die Daten sukzessive in Richtung der Basisstation weiterleiten [9]. Demzufolge kann K_{opt} als die optimale Anzahl von Teilstrecken (Hops) angesehen werden, welche entweder $\lfloor D/d_{\text{char}} \rfloor$ oder $\lceil D/d_{\text{char}} \rceil$ beträgt. Hierbei bezeichnet d_{char} die *charakteristische Distanz* gegeben durch $(\alpha/(\epsilon(\gamma - 1)))^{1/\gamma}$. Die charakteristische Distanz ist abhängig von den Parametern α und ϵ der Übertragungskomponenten eines Sensormodules sowie der Freiraumdämpfung γ . Vorausgesetzt, dass alle Sensormodule mit den gleichen Übertragungskomponenten ausgestattet und die Übertragungsbedingungen (Luftfeuchtigkeit, Anzahl von Hindernissen etc.) netzwerkweit stabil sind, kann die charakteristische Distanz als globale Konstante angesehen werden. Sie hat demzufolge für jeden Sensorknoten den gleichen Wert.

Bei gegebener Distanz D zur Basisstation gilt es nun zu entscheiden, welche der beiden Alternativen für K_{opt} tatsächlich den Optimalpfad charakterisiert. Entsprechende Betrachtungen fanden in den bisher veröffentlichten Artikeln keine Berücksichtigung. Wird $m = \lfloor D/d_{\text{char}} \rfloor$ und $\delta = D/d_{\text{char}} - m$ gesetzt, so kann die Entscheidung nach folgendem Kriterium [12] getroffen werden: Die Wahl $K_{\text{opt}} = \lfloor D/d_{\text{char}} \rfloor$ ist optimal wenn $\delta \leq (m^2 + m)^{1/2} - m$ für $\gamma = 2$ bzw. $\delta \leq (3m^3(m + 1)^3 / (3m^2 + 3m + 1))^{1/4} - m$ für $\gamma = 4$.

Andernfalls ist der durch $\lceil D/d_{char} \rceil$ gegebene Wert vorzuziehen. Somit kann nun für jeden Sensor der theoretisch optimale Routingpfad zur Basisstation ermittelt werden. Bei der Beurteilung der in diesem Artikel betrachteten Routingprotokolle dient der Gesamtenergieverbrauch entlang der Optimalpfade als untere Schranke.

MERR: Minimum Energy Relay Routing

Um einen optimalen Routingpfad zu konstruieren, kann eine bestimmte Anzahl von Relais ($K_{opt} - 1$) in konstanten Abständen zwischen Sensor und Basisstation angebracht werden. In realen Sensornetzwerken, wo die Sensoren bereits an fest vorgegebenen Positionen verankert sind und diese in der Regel auch nicht mehr umgesetzt werden können, ist es allerdings äußerst unwahrscheinlich, dass ein optimaler Pfad existiert. Die einzig noch verbleibende Alternative ist auf Grundlage der gegebenen Sensorverteilung nach Routingpfaden zu suchen, welche die Optimalpfade bestmöglich approximieren.

Entsprechend der Betrachtung zu optimalen Routingpfaden kann die charakteristische Distanz als die optimale Distanz zwischen benachbarten Relais angesehen werden. Ein Relais sollte demnach genau die charakteristische Distanz weit übertragen, um den Gesamtenergieverbrauch entlang des kompletten Pfades zur Basisstation zu minimieren. Diese wesentliche Beobachtung führt direkt zur Kernidee des MERR-Protokolls. Während einer Konfigurationsphase sucht jeder Sensor eigenständig innerhalb seines maximalen Übertragungsradius nach dem Nachbarn, dessen Entfernung am wenigsten von der charakteristischen Distanz abweicht. Dabei werden nur die Nachbarn berücksichtigt, die sich näher an der Basisstation befinden als der Sensor selbst. Hat ein Sensor den geeigneten Nachbarknoten ermittelt, regelt er die Ausgangsleistung seiner Sendeeinheit soweit herunter, dass der ausgewählte Nachbar die zu übertragenden Daten gerade noch fehler- und verlustfrei empfangen kann. Die Übertragung erfolgt also mit minimalem Energieaufwand. Während des Normalbetriebs werden stets sowohl die eigenen als auch die von anderen Sensoren empfangenen Daten an den vorher bestimmten Nachbarknoten weitergeleitet.

Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau eines Routingpfades in MERR. Im ersten Schritt wählt Sensor 5 seinen direkten Nachbarn Sensor 4, da

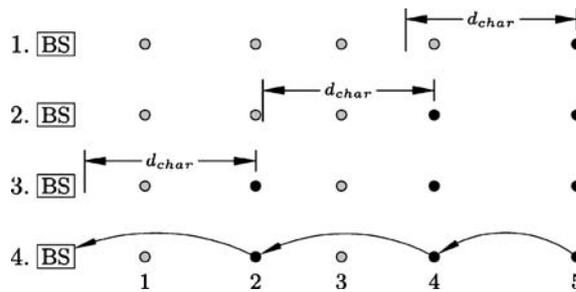


Abb. 1 Ein Routingpfad in MERR

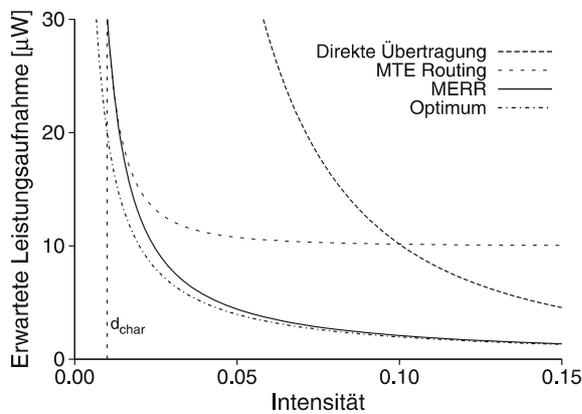


Abb. 2 Erwartete Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Intensität

seine Entfernung am wenigsten von der charakteristischen Distanz d_{char} abweicht. Sensor 4 überspringt seinen direkten Nachbarn Sensor 3 und entscheidet sich stattdessen für Sensor 2. Sensor 2 wiederum sendet direkt zur Basisstation (BS). Im Normalbetrieb werden also die von Sensor 5 generierten Daten unter Zuhilfenahme der Relais 4 und 2 zur Basisstation übertragen.

Abbildung 2 zeigt die Leistungsfähigkeit von MERR im Vergleich zu den besprochenen konventionellen Ansätzen und dem theoretischen Optimum. Die den Graphen zugrunde liegenden Funktionsgleichungen sind Ergebnisse stochastischer Untersuchungen. Sie zeigen die zu erwartende Leistungsaufnahme in Abhängigkeit von der Intensität des Poisson-Prozesses, d.h. der mittleren Anzahl von Sensorknoten pro Längeneinheit (Sensordichte). Die durch Simulation bestimmten Verbrauchswerte sind nahezu identisch mit den hier dargestellten analytischen Ergebnissen. Die Anzahl der Sensorknoten beträgt 100. Als Freiraumdämpfung ist der Wert 2 gewählt. Die Parameter der Übertragungskomponenten sind aus [5] übernommen.

In Abb. 2 ist zu erkennen, dass die Methode der direkten Datenübertragung bei geringer Intensität einen sehr hohen Energiebedarf aufweist. Deshalb spielt dieser Ansatz in der Praxis eine eher untergeordnete Rolle. Es werden stattdessen bevorzugt Multihop-Protokolle eingesetzt. Bezüglich der Graphen für MTE, MERR und des Optimums wird folgender Zusammenhang erkennbar: Der Energieverbrauch von MERR ist nach oben durch MTE (obere Schranke) und nach unten durch das Optimum (untere Schranke) beschränkt. Genauer gesagt nähert sich bei abnehmender Intensität der Energieverbrauch von MERR dem von MTE an; bei zunehmender Intensität strebt dieser gegen das Optimum. Dies lässt sich folgendermaßen erklären: Nimmt die Intensität ab, vergrößert sich die mittlere Entfernung zwischen benachbarten Sensoren. Ist nun die mittlere Entfernung eines Sensors zu seinem direkten Nachbarknoten größer oder gleich der charakteristischen Distanz (gekennzeichnet in Abb. 2), wird sehr wahrscheinlich gerade dieser direkte Nachbar von MERR ausgewählt. Die Routingentscheidungen von MERR sind somit identisch mit denen von MTE. Folglich haben beide Protokolle den gleichen Energiebedarf. Im schlechtesten Fall verbraucht also MERR genauso viel Energie wie MTE. Die Annäherung von MERR an das Optimum beruht auf der Tatsache, dass bei zunehmender Intensität die mittlere Anzahl von Nachbarn eines Sensors ebenfalls zunimmt. Folglich wird es immer wahrscheinlicher, einen Sensor zu finden, dessen Entfernung nur unwesentlich von der charakteristischen Distanz abweicht. Die dann entstehenden Routingpfade kommen den Optimalpfaden sehr nahe. Quantitativ lassen sich zum Vergleich von MERR mit MTE und dem theoretischen Optimum folgende Aussagen treffen: Für ein lineares Sensornetzwerk, dessen Knoten im Mittel 10 Meter voneinander entfernt sind und bei einer angenommenen Freiraumdämpfung von 2 beträgt die durch MERR im Vergleich zu MTE eingesparte Energie 80%. Sind bei gleicher Freiraumdämpfung benachbarte Sensoren im Mittel 50 Meter oder weniger voneinander entfernt, so weicht der Energiebedarf von MERR weniger als 10% vom Optimum ab.

Schlussfolgerungen

Dieser Artikel beschreibt die Arbeitsweise des Minimum Energy Relay Routing (MERR)-Protokolls,

eines speziell für Sensornetzwerke mit linearer Topologie entwickelten Routingprotokolls. Ein Sensor entscheidet mittels MERR eigenständig, zu welchem seiner Nachbarknoten Nachrichten weitergeleitet werden sollen. Um diese Entscheidung treffen zu können, muss er lediglich die Entfernungen zu seinen erreichbaren Nachbarsensoren sowie die (konstante) charakteristische Distanz kennen. Durch diese nur auf lokalem Wissen beruhende Arbeitsweise von MERR werden sowohl eine geringe Implementierungs- und Laufzeitkomplexität als auch eine gute Skalierbarkeit erreicht. Zudem kann der Einsatz von MERR den Energiebedarf des gesamten Sensornetzwerkes im Vergleich zu existierenden Routingstrategien beträchtlich verringern. Die Ergebnisse von stochastischen Untersuchungen und Simulationen zeigen weiterhin, dass MERR für praktisch denkbare Sensorverteilungen nahe am theoretischen Minimum arbeitet.

Obwohl die ersten Ergebnisse vielversprechend sind, gilt es auf dem Weg zur praktischen Anwendung von MERR noch weitere Aspekte zu betrachten. Einer dieser offenen Punkte ist die Forderung nach Fairness. Da die von MERR einmal aufgebauten Routingpfade während des Betriebes unverändert bestehen bleiben, kann es passieren, dass bestimmte Sensorknoten unentwegt eine viel größere Datenlast tragen müssen als andere. Diese Sensorknoten verbrauchen folglich ihre Energiereserven sehr schnell und werden rasch ausfallen. Im Extremfall kann dies zu einer Netzwerkpartitionierung führen, sodass für einen Teil des Sensornetzes keine Verbindung mehr zur Basisstation besteht. Um diesen Effekt abzuschwächen, sollten adaptive Routingmetriken in MERR eingebaut werden. Beispielsweise könnte ein Sensor bei der Auswahl eines geeigneten Nachbarknotens dessen aktuellen Batteriestatus berücksichtigen und Nachbarn mit vergleichsweise hohen Energiereserven bevorzugen. Des Weiteren ist ein „Medium Access Control“ (MAC)-Protokoll wünschenswert, das genau auf die Arbeitsweise von MERR abgestimmt ist. Dieses sollte sicherstellen, dass nur die Sensorknoten ihre Übertragungseinheiten eingeschaltet haben, welche auch tatsächlich für den aktuellen Routingvorgang benötigt werden. Alle anderen Sensoren können in einem energiesparenden Betriebsmodus verharren. Erst durch einen solchen schichtenübergreifenden Ansatz kann ein

effektiver Einsatz von MERR in der Praxis erreicht werden.

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei Dr. Johnathan M. Reason vom IBM T. J. Watson Research Center in Hawthorne, USA, sowie bei Dr. Walteneus Dargie von der Technischen Universität Dresden für Ihre Unterstützung und konstruktiven Hinweise bedanken. Mein Dank gilt weiterhin allen, die Kommentare und Anregungen zu früheren Versionen dieses Artikels gaben.

Literatur

1. Al-Karaki JN, Kamal AE (2004) Routing techniques in wireless sensor networks: A survey. *IEEE Wirel Commun Mag* 11(6):6–28
2. Bhardwaj M, Garnett T, Chandrakasan A (2001) Upper Bounds on the Lifetime of Sensor Networks. In: *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 11.–14. Juni 2001, Helsinki, Finnland, S 785–790
3. Estrin D, Govindan R, Heidemann J, Kumar S (1999) Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks. In: *IEEE/ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, 15.–19. August 1999, Seattle, Washington, USA, S 263–270
4. Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H (2000) Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In: *Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, 4.–7. Januar 2000, Maui, Hawaii, USA, S 1–10
5. Heinzelman W (2000) *Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks*. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA
6. Kim S, Pakzad S, Culler D, Demmel J, Fenves G, Glaser S, Turon M (2007) Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks. In: *IEEE/ACM International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, 25.–27. August 2007, Cambridge, Massachusetts, USA, S 254–263
7. Kingman JFC (1993) *Poisson Processes*. Oxford University Press, Oxford New York
8. Rappaport TS (1996) *Wireless Communications: Principles & Practice*. Prentice-Hall, New Jersey
9. Stojmenovic I, Lin X (2001) Power-aware localized routing in wireless sensor networks. *IEEE Trans Parallel Distrib Syst* 12(11):1122–1133
10. Stoianov I, Nachman L, Madden S (2007) PIPENET: A Wireless Sensor Network for Pipeline Monitoring. In: *IEEE/ACM International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, 25.–27. August 2007, Cambridge, Massachusetts, USA, S 264–273
11. Zimmerling M, Dargie W, Reason JM (2007) Energy-Efficient Routing in Linear Wireless Sensor Networks. In: *IEEE International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS)*, 8.–11. Oktober 2007, Pisa, Italien, S 1–3
12. Zimmerling M, Dargie W, Reason JM (2008) Localized Power-Aware Routing in Linear Wireless Sensor Networks. In: *ACM Workshop on Context-Awareness for Self-Managing Systems (CASEMANS)*, 19. Mai 2008, Sydney, Australien, S 24–33