

Graduiertenkolleg 1103
Embedded Microsystems



Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Energy-Efficient Broadcasts

Statusbericht

Christian Gunia

Betreuer: Prof. Dr. Susanne Albers
Lehrstuhl: Algorithmen und Komplexität

Freiburg, im September 2008



Institut für Informatik



Institut für Mikrosystemtechnik

1 Aktueller Stand der Promotion

Die Dissertation wurde am 27. Dezember 2007 abgeben und die Verteidigung fand am 31. Juni 2008 erfolgreich statt.

2 Zusammenfassung der Dissertation

In den letzten Jahrzehnten gewinnt die energieeffiziente Durchführung von Aufgaben in einer Großzahl an Bereichen zunehmend an Bedeutung. Dieser Effekt ging auch an der Forschung in der Informatik und Mikrosystemtechnik nicht spurlos vorüber. Eine stetig wachsende Anzahl an Forschungsanträgen und Veröffentlichungen berücksichtigt diesen Aspekt zumindest oder widmet sich ihm sogar weitestgehend vollständig.

In meiner Promotion im Rahmen des Graduiertenkollegs „Eingebettete Mikrosysteme“ untersuchte ich vor allem die zeitlichen Aspekte der energieeffizienten Übertragung von Informationen. Hierbei stehen Übertragungsmethoden im Vordergrund, die auf Netzwerkstrukturen arbeiten und einen Broadcast ermöglichen. Dabei bezeichnet der Begriff Broadcast die Möglichkeit, eine im Netzwerk verschickte Information nicht nur an einen Adressaten zu richten, sondern sie an alle empfangsbereiten Geräte gleichzeitig zu senden. Offensichtlich bietet diese Möglichkeit das Potenzial die sendenden Geräte, von häufig angefragten Informationen deutlich zu entlasten. Meine Dissertation beschäftigt sich mit drei verschiedene Szenarien über die im Folgenden zusammen mit Resultaten einen Überblick verschafft werden soll.

2.1 Übertragungskanäle mit konstanter Geschwindigkeit

Gegeben sei ein Netzwerk mobiler Geräte, deren Kommunikation durch eine drahtlose Verbindung realisiert ist. Der Einsatzzweck dieser Geräte erfordere einen regelmäßigen Kommunikationsaustausch. Wir fokussieren uns auf ein einzelnes Gerät, das im Besitz von Informationen ist, auf die die anderen Geräte zugreifen möchten. In der Literatur werden diese Informationen häufig als *Informationsseiten* oder *Seiten* bezeichnet. Im Folgenden nennen wir dieses ausgezeichnete Gerät *Server* und die restlichen *Klienten*. Die Klienten stellen im Laufe der Zeit Anfragen an den Server, in der sie ihm die gewünschte Informationsseite mitteilen. Der Server wird von Zeit zu Zeit die angefragten Informationen über die drahtlose Kommunikationsschnittstelle versenden. Wir abstrahieren von dem konkreten Netzwerk und betrachten ein Modell, das uns den Einfluss der Sendezeitpunkte isolieren und somit untersuchen läßt. Sendet der Server in dem betrachteten Modell zum Zeitpunkt t eine Information ab, so erreicht diese alle empfangsbereiten Klienten, d.h. alle Klienten, die diese Information erbeten haben gleichzeitig.

Der Server kann die Anzahl der Sendungen, und somit seinen Energieverbrauch, senken, indem er Informationen seltener sendet. Gleichzeitig verlängert sich durch diese Maßnahme die Zeit, die die Klienten bis zum vollständigen Erhalt der erbetenen Information warten. Wir verwenden diese Wartezeit als Maß der vom Server bereitgestellten Servicequalität und beobachten, dass sich diese Art der Energieeinsparung negativ auf die bereitgestellte Servicequalität auswirkt.

Typische Anwendungsszenarien mobiler Ad-Hoc Netzwerke zeigen, dass die dort eingesetzten Geräte lediglich über einen begrenzten Energiespeicher, beispielsweise in Form einer Batterie, verfügen. Diesem tragen wir Rechnung, indem wir die dem Server zur Verfügung stehende Energie ebenfalls limitieren. Daher besteht seine Aufgabe in der Findung eines Sendepfades, d.h. einer Folge von Sendezeitpunkten, die einen Kompromiss zwischen der angebotenen Servicequalität, in Form der Wartezeiten, und der damit realisierbaren Betriebsdauer des Servers darstellt.

Verschiedene Aspekte und Versionen dieses Problems wurden in der Veröffentlichung [3] betrachtet, deren Ergebnisse wir im Folgenden kurz umreißen. Im Wesentlichen unterscheiden wir zwei grundlegend verschiedene Versionen. In der Offline-Version liegen dem Server bereits alle Anfragen zu Beginn seiner Laufzeit vor. In diesem Fall zeigt die Analyse, dass eine Berechnung eines Sendeplans, der die Summe der Wartezeiten der Klienten minimiert, in polynomieller Zeit möglich ist, solange die Anzahl der bei dem Server angefragten Seiten konstant bleibt. Dazu werden zunächst strukturelle Informationen optimaler Lösungen ermittelt und anschließend eine Reihe von Algorithmen entwickelt, die eine schrittweise Verbesserung der erreichten Wartezeit erzielen.

Im Falle der Online-Version, bei der die Anfragesequenz dem Server erst nach und nach aufgedeckt wird, zeigen wir sowohl obere als auch untere Schranken für den erreichbaren kompetitiven Faktor auf. Dieser Faktor entspricht dem Verhältnis zwischen der erreichten Wartezeit (im Online-Fall) und der besten erreichbaren Wartezeit (im Offline-Fall). Die ermittelten Schranken sind für alle untersuchten Versionen asymptotisch identisch, d.h. die sie unterscheiden sich maximal um einen konstanten Faktor. Somit sind die präsentierten Online-Algorithmen in dem Sinne optimal, dass es keinen Algorithmus geben kann, der auf allen Anfragesequenzen ein (asymptotisch) besseres Verhältnis bieten kann. Es zeigt sich, dass die gleichmäßige Einteilung der Energie einen (asymptotisch) optimalen kompetitiven Faktor liefert. Gleichzeitig ermöglicht diese Einteilung es dem Server einem anfragenden Klienten den Zeitpunkt der nächsten Übertragung der angefragten Informationen unmittelbar nach Erhalt der Anfrage mitzuteilen. Daher ist der Klient in der Lage seine drahtlose Kommunikationsschnittstelle bis zu diesem Zeitpunkt auszuschalten und somit ebenfalls Energie zu sparen. Wie die Analyse darüber hinaus zeigt, vermag auch eine randomisierte Wahl der Sendezeitpunkte den erreichbaren kompetitiven Faktor um nicht mehr als eine (kleine) Konstante zu reduzieren — wir möchten erwähnen, dass sich diese Aussage jedoch auf den erwarteten kompetitiven Faktor bezieht.

2.2 Übertragungskanäle mit regelbarer Geschwindigkeit

In dem zweiten Szenario, das wir ausführlich untersuchen, ist der Server in der Lage die Sendegeschwindigkeit des Übertragungskanals individuell für jede Sendung einzustellen. Hierbei gehen wir davon aus, dass zur Erreichung einer höheren Sendegeschwindigkeit ein besseres Signal-zu-Rausch-Verhältnis erforderlich ist, und somit einen höheren Energieverbrauch induziert. Dementsprechend ist der Server in der Lage Energie einzusparen, indem er die Übertragungsgeschwindigkeit auf ein notwendiges Maß reduziert.

Angelehnt an die Arbeit von Yao *et al.* [4] aus dem Jahre 1995 modellieren wir den Energieverbrauch E pro Zeiteinheit abhängig von der Übertragungsgeschwindigkeit s als $E = s^\alpha$. Hierbei bezeichnet der Exponent α das so genannte Energie-Geschwindigkeit-Verhältnis, das stark von der eingesetzten Technologie abhängt. Des Weiteren betrachten wir in diesem Szenario lediglich Klienten, die dem Server zusätzlich zu der angefragten Seite ebenfalls eine Frist mitteilen, bis zu der die Antwort erfolgt sein muss. Jede Anfrage ist somit an ein Zeitintervall gekoppelt, das von der Bekanntgabe der Anfrage bis zu dessen Frist reicht. Sollte der Server in diesem Intervall die angefragte Information nicht vollständig übermitteln, so gilt die Anfrage als unbeantwortet.

Der Hauptteil der Arbeit [1] beschäftigt sich mit dem Fall, dass lediglich eine Informationsseite auf dem Server gespeichert ist. Für diesen Single-Page Fall zeigt die Arbeit, dass in der Offline-Version, d.h. bei vollständiger Kenntnis aller zukünftigen Anfragen, ein energieoptimaler Sendeplan in polynomieller Zeit berechnet werden kann. Der diesem Resultat zugrunde liegende Algorithmus folgt dem Prinzip der dynamischen Programmierung und fußt auf folgender strukturellen

Eigenschaft: Ein energieoptimaler Sendepfad besteht aus Blöcken von gleichlangen Sendungen; Blöcke wiederum bestehen aus nahtlos aneinandergrenzenden, gleichschnellen Sendungen; fassen wir die Menge aller Anfragezeitpunkte und Fristen als Ereigniszeitpunkte zusammen, so beginnt und endet ein solcher Block immer an einem Ereigniszeitpunkt. Diese Eigenschaft ermöglicht eine Zerlegung der Anfrage an Ereigniszeitpunkten in kleinere Subanfragen, die sich entweder erneut zerlegen oder trivial durch Übermittlung eines Blocks lösen lassen. Der Algorithmus rekonstruiert nun angefangen bei trivialen Instanzen den optimalen Sendepfad der gegebenen Anfragesequenz.

Auch bei der Online-Version dieses Problems unterscheiden wir wiederum zwischen dem Single-Page und Multi-Page Fall. Wir präsentieren einen strukturell einfachen Online-Algorithmus und beweisen, dass dieser im Allgemeinen einen kompetitiven Faktor von $O(2^\alpha)$ garantiert. Falls alle Anfragen die gleiche Länge aufweisen, erreicht der Algorithmus sogar einen Faktor $O((3/2)^\alpha)$. Auf natürlichste Art und Weise stellt sich nun die Frage, ob es einen Algorithmus gibt, der einen besseren kompetitiven Faktor erreicht. Um dies zu verneinen, konstruieren wir für jeden denkbaren Online-Algorithmus eine Eingabesequenz, auf der ein kompetitiver Faktor von $O((2 - \varepsilon)^\alpha)$ zu einem Widerspruch führt. Dazu verwenden wir eine Technik, die als "wachsender Spalt" bezeichnet werden kann: Bei jeder zusätzlich gestellten Anfrage verwendet der Algorithmus einen größeren Anteil des Zeitintervalls, das die Anfrage umspannt, *nicht* zur Beantwortung eben dieser. Daraus ergibt sich nach endlich vielen Schritten ein Widerspruch. Dies zeigt, dass das oben genannte Algorithmus in diesem Fall bezüglich des kompetitiven Faktors optimal ist. In einem weiteren Schritt zeigen wir, dass randomisierte Algorithmen auch in diesem Szenario keinen (wesentlichen) Vorteil bieten, d.h. ihr erwarteter kompetitiver Faktor ebenfalls durch $\Omega((2 - \varepsilon)^\alpha)$ nach unten beschränkt ist.

In einem weiteren Abschnitt erweitern wir diesen Algorithmus kanonisch, sodass er auch im Multi-Page Fall gültige Sendepfade konstruiert und beweisen, dass diese einen endlichen kompetitiven Faktor aufweisen. Die beiden bisher entwickelten Algorithmen legen die Übertragungsgeschwindigkeit bei Sendungsbeginn fest und ändern diese anschließend nicht mehr – es kann jedoch vorkommen, dass sie eine Sendung abbrechen. Da es durchaus denkbar erscheint, die Geschwindigkeit auch von bereits laufenden Übertragungen zu ändern, heben wir diese Einschränkung im letzten Teil der Arbeit auf. Wir zeigen durch Anwendung des Minimax-Prinzip von Yao, dass auch in diesem Szenario der beste erreichbare kompetitive Faktor exponentiell von dem Energie-Geschwindigkeits-Verhältnis abhängt.

2.3 Energieeffizienz bei Einwegverbindungen

Während die Ergebnisse der letzten beiden bisher genannten Veröffentlichungen wesentlich darauf aufbauten, dass eine zweiseitige Verbindung zwischen den Klienten und dem Server besteht, betrachten wir in dieser Arbeit Energieeinsparungspotenziale in Netzwerken, in denen lediglich eine Verbindung vom Server zu den Klienten existiert. Dies kann verschiedenste Ursachen haben. Da die Klienten in einem solchen Fall keinerlei Anfragen explizit stellen können, überträgt der Server die Informationsseiten auf regelmäßiger Basis zu den Klienten.

Um eine gewissen Servicequalität zu gewährleisten ist jede Informationsseite mit einer Fensterlänge verknüpft, die die maximale Dauer zwischen zwei Sendungen dieser Seite nach oben beschränkt. Ein Klient wartet bis zum vollständigen Empfang einer Seite, an die eine Fensterlänge w geknüpft ist, maximal w Zeiteinheiten. Um einen gültigen Sendepfad zu erhalten, muss der Server die Fensterlänge einer jeden Seite einhalten. In der Veröffentlichung [2] betrachten wir das Einsparpotenzial, das die Anpassung der Sendegeschwindigkeit in diesem Szenario bietet. Der Server legt zu Beginn einer jeden Sendung die Übertragungsgeschwindigkeit fest, und wir

verwenden erneut das in [1] eingeführte Energiemodell.

Da es sich hier um Sendepläne handelt, die ohne Rückmeldung der Klienten entstehen, betrachten wir lediglich die Offline-Version, in der bereits alle Informationsseiten und Fensterlängen zu Beginn der Berechnung zur Verfügung stehen. Wir bemerken, dass jede Lösung des Problems, d.h. jeder Sendeplan, inhärent aus einer unendlichen Anzahl an Übertragungen besteht und somit keinen endlichen Energieverbrauch induziert. Daher führen wir ein geeignetes Effizienzmaß für Sendepläne ein, um diese bezüglich ihrer Energieeffizienz vergleichen zu können. Im Wesentlichen misst dieses den durchschnittlichen Energieverbrauch pro Zeiteinheit, weshalb wir es als Energiedichte bezeichnen.

Mit Ausnahme der Einhaltung der Fensterlängen stellen wir keine weiteren Einschränkungen an gültige Sendepläne. Insbesondere fordern wir nicht, dass der konstruierte Sendeplan periodisch ist, d.h. dass er aus einer stetigen Wiederholung eines endlich langen Sendeplans besteht. Sollte er jedoch so strukturiert sein, so nennen wir den kürzesten endlichen Sendeplan dieser Art *Repräsentation* und den ursprünglichen Plan *periodisch*. Offensichtlich beschreibt die Repräsentation den Sendeplan vollständig, weshalb solche Pläne einfach zu speichern und zu verarbeiten sind, und fokussieren uns in der Arbeit auf sie. Dass dies keine wesentliche Einschränkung darstellt zeigen wir, indem wir für jedes beliebig kleine $\varepsilon > 0$ eine Konvertierungsmethode angeben, die einen beliebigen Sendeplan in einen periodischen überführt und dabei die Energiedichte höchstens um einen Faktor $1 + \varepsilon$ erhöht.

Im zweiten Teil der Arbeit leiten wir einen strukturell einfachen Algorithmus her, der für den Fall, dass dem Server nur ein Übertragungskanal zur Verfügung steht einen Sendeplan erzeugt, der vor der optimalen Energiedichte höchstens um einen konstanten Faktor abweicht. Dieser Sendeplan verwendet während seiner gesamten Laufzeit ausschließlich zwei Geschwindigkeiten, die darüber hinaus um nicht mehr als einen Faktor 2 voneinander abweichen.

Im letzten Abschnitt erweitern wir diesen Algorithmus schließlich weitestgehend kanonisch, sodass er auch für den Fall mehrerer gleichförmiger Übertragungskanäle einen Sendeplan berechnet, dessen Energiedichte höchstens um einen konstanten Faktor von der optimalen Energiedichte abweicht. Dabei bezeichnen wir zwei Kanäle als gleichförmig, falls sie das gleiche Energie-Geschwindigkeits-Verhältnis aufweisen.

Literatur

- [1] P. Briest and C. Gunia. “Energy-efficient broadcast scheduling for speed-controlled transmission channels”. In *Proceedings of the International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC)*. Kolkata, India, 2006, pp. 670–679.
- [2] C. Gunia. “Energy-efficient windows scheduling”. In *Proceedings of the International Conference on Current Trends in Theory and Practice of Computer Science (SOFSEM)*. Novy Smokovec, Slovakia, 2008, pp. 304–315.
- [3] C. Gunia. “On broadcast scheduling with limited energy”. In *Proceedings of the International Conference on Algorithms and Complexity (CIAC)*. Rome, Italy, 2006, pp. 151–162.
- [4] F. Yao, A. Demers, and S. Shenker. “A scheduling model for reduced CPU energy”. In *Proceedings of the Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS)*. Milwaukee, WI, USA, 1995, pp. 374–382.