

## **Greening Network Links**

Jan Knipper <knipper@mi.fu-berlin.de>

18. Juni 2010

Freie Universität Berlin, Fachbereich Informatik

Proseminar Technische Informatik

Sommersemester 2010

Dozent/Betreuer: Matthias Wählisch

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b><i>Einleitung</i></b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b><i>Energieverbrauch</i></b>	<b>4</b>
2.1	<i>Vergleich verschiedener Ethernet-Bandbreiten . . . . .</i>	4
2.2	<i>Linkauslastung . . . . .</i>	6
<b>3</b>	<b><i>Methoden zum Energiesparen</i></b>	<b>7</b>
3.1	<i>Bandbreitenreduzierung . . . . .</i>	7
3.2	<i>Sleep-State von Netzwerkkomponenten . . . . .</i>	7
3.3	<i>Einsparung im Vergleich . . . . .</i>	8
3.4	<i>Optimierung auf Protokollebene . . . . .</i>	9
3.5	<i>Probleme . . . . .</i>	10
<b>4</b>	<b><i>Fazit</i></b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b><i>Literaturverzeichnis</i></b>	<b>11</b>

## 1 Einleitung

Es wird heutzutage immer mehr Energie benötigt, um die steigenden Bedürfnisse nach Kommunikation und somit nach mehr Bandbreite zu befriedigen. Zwar wird pro übertragenen Byte immer weniger Energie gebraucht, da es große Fortschritte in der Halbleiterindustrie in diesem Bereich gibt. Der Bedarf an Bandbreite wächst jedoch schneller und der Energieverbrauch steigt. Bei Wireless-Netzwerken sind geeignete Mittel zur Energieeinsparung schon weiter verbreitet, da es sich oft um mobile Geräte handelt. Aber auch in klassischen Netzwerken haben Anbieter von Kommunikationsinfrastruktur ein gesteigertes Interesse entwickelt Energie einzusparen, um Kosten zu senken. Gleichzeitig lässt sich dieses beim Verbraucher gut vermarkten, da das Bewusstsein für Energieeinsparung und Umweltschutz zunimmt. Die Hersteller von Netzwerkkomponenten reagieren entsprechend mit neuen Produkten auf diese geänderten Anforderungen.

Zur Senkung des Energieverbrauchs in Netzwerken können bestimmte Muster bei der Auslastung von Verbindungen ausgenutzt werden. Es werden Methoden zur Verminderung des Energiebedarfs auf Hardware- und Protokollebene diskutiert.

In dieser Ausarbeitung wird auf den Energieverbrauch bestimmter Linktypen, vorzugsweise Ethernet, in Abhängigkeit von der Auslastung fokussiert. Anschließend wird auf Methoden zur Einsparung von Energie in Verbindungen und resultierende Probleme eingegangen. Eine wichtige Rolle spielen dabei die Arbeiten der IEEE P802.3az, der Energy Efficient Ethernet (EEE) Task Force.

Im zweiten Teil der Arbeit wird der Energieverbrauch in Netzwerkverbindungen in Abhängigkeit von Auslastung, Bandbreite und Protokoll bearbeitet. Es wird gezeigt wieviel Energie typische Netzwerkverbindungen benötigen und wie hoch der Energieverbrauch bei 10 Mb/s, 100 Mb/s, 1 Gb/s und 10 Gb/s Ethernet-Netzwerken ist. Der darauf folgende Absatz stellt Methoden zur Energieeinsparung über Sleeping

und Bandbreitenanpassung sowie auf Protokollebene vor. Dort wird auf daraus resultierende Probleme wie Latenz, Buffering und Paketverlust hingewiesen.

## 2 Energieverbrauch

### 2.1 Vergleich verschiedener Ethernet-Bandbreiten

In Bild 1 wird der Energiebedarf der verschiedenen Ethernet-Bandbreiten unter Berücksichtigung einer verschiedenen Anzahl von aktiven Verbindungen dargestellt. Es ist unschwer zu erkennen, dass der Verbrauch bei einer höheren Bandbreite bzw. steigender Anzahl von Verbindungen zunimmt. Die Grafik beruht auf groben Messungen bei voller Last (Ausnahme 1 Gb/s Link, wie angegeben) auf einem typischen 24-Port 10/100/1000 Mb/s Ethernet-Switch. Zu bemerken ist, dass der Energieverbrauch bei unausgelastetem und ausgelastetem 1 Gb/s Link nur unsignifikant zunimmt.

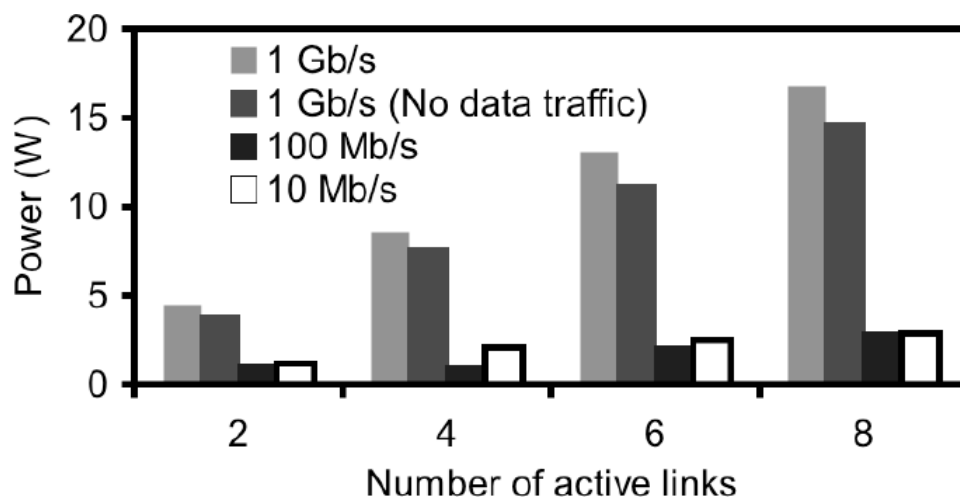


Bild 1: Energieverbrauch bei verschiedenen Bandbreiten und Linkanzahl [5]

Bild 2 zeigt den Energiebedarf eines Netzwerkinterfaces bei unterschiedlichen Bandbreiten. Die Angaben sind über mehrere Rechner gemittelt. Bemerkenswert ist, dass gerade im 10 Gb/s Bereich der Energieverbrauch überproportional zunimmt.

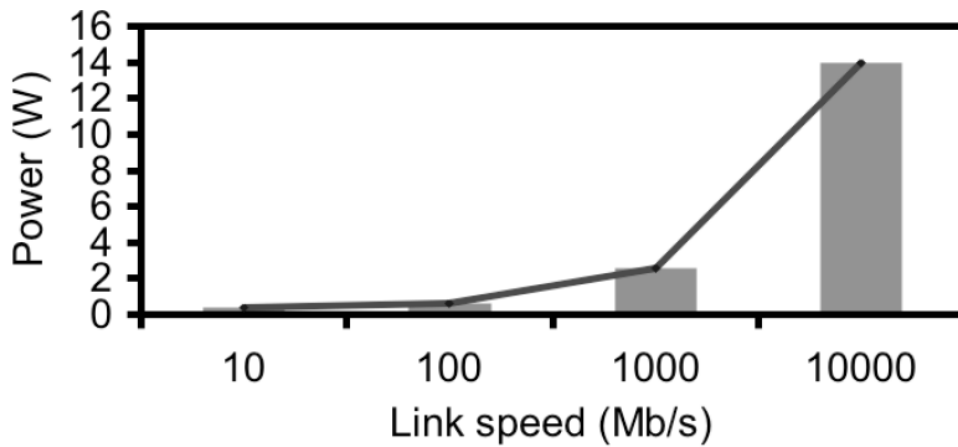


Bild 2: Durchschnittlicher Stromverbrauch eines Netzwerkinterfaces bei verschiedenen Bandbreiten [5]

In Bild 3 wird der Energieverbrauch eines 1 Gb/s Switches dargestellt. Die Auslastung wird über das Intervall  $t_{Util}$  (Balken im Diagramm) angegeben. Der Stromverbrauch wird durch die gestrichelte Linie gekennzeichnet. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Energieverbrauch bei steigender Last stark zunimmt. Die durchgehenden Linien zeigen die durchschnittlichen Antwortzeiten des Switches für die beiden Intervalle an.

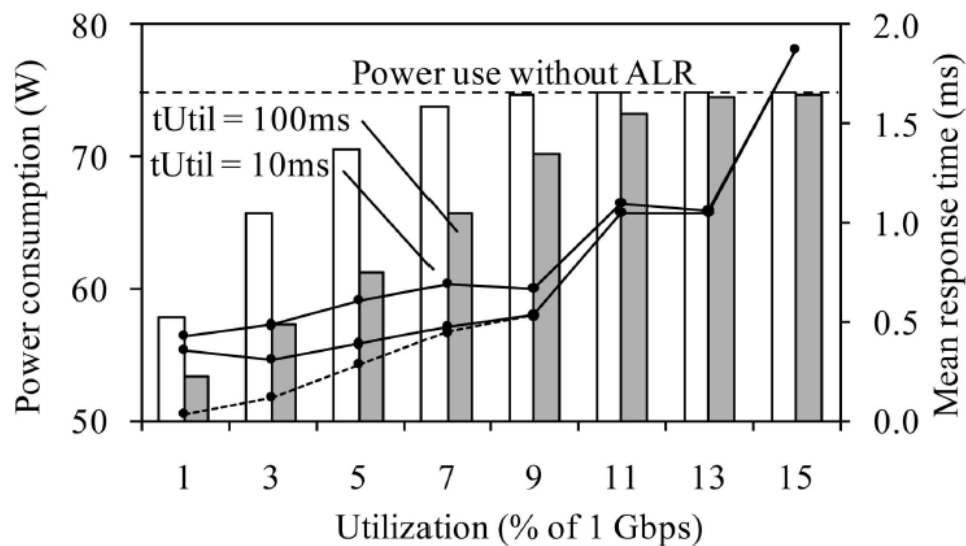


Bild 3: Energieverbrauch eines 1 Gb/s Switches ohne Bandbreitenanpas-

sung [11]

## 2.2 Linkauslastung

Die Auslastung eines typischen Ethernet-Links ist dadurch gekennzeichnet, dass er wenig oder überhaupt nicht ausgelastet wird. Es kommt lediglich hin und wieder zu Spitzen (Bursts), wenn größere Mengen an Daten übertragen werden. In Bild 4 ist ein charakteristisches Beispiel für die Last eines Ethernet-Links angezeigt. Die genutzte Bandbreite beträgt in der Regel nur zwischen 1 und 5% [7, 8] und ist von wenigen Bursts abgesehen sehr gering.

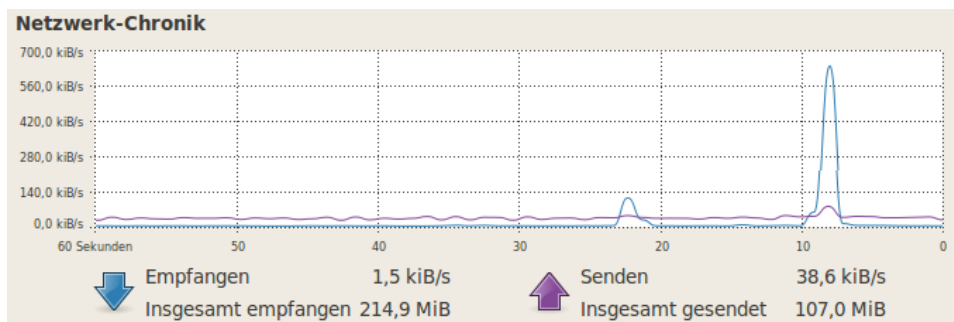


Bild 4: Linkauslastung eines typischen 100 Mb/s Ethernet-Links (Desktop-PC)

In Bild 5 ist die Momentaufnahme der Linklast eines Servers abgebildet. Ähnlich wie beim Desktop-PC kommt es zu Spitzen, ansonsten ist das Aufkommen der übertragenen Daten eher gering.

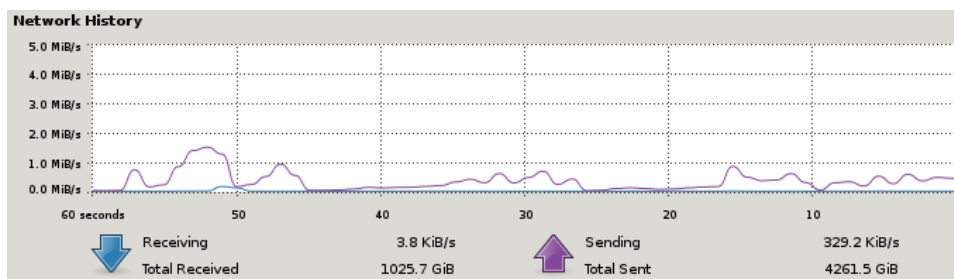


Bild 5: Linkauslastung eines typischen 1 Gb/s Ethernet-Links (Server)

Es ist also festzuhalten, dass die volle Bandbreite eines Links sehr

selten benötigt wird. Aber gerade die Bandbreiten im Gigabit-Bereich benötigen ein Vielfaches der Energie im Vergleich zu geringeren Linkgeschwindigkeiten. Die Kombination der beiden genannten Eigenschaften legt nahe, den Energieverbrauch über eine Reduzierung der Bandbreite im Fall von temporär wenig ausgelasteten Links und über einen Sleep-State der Hardware zu reduzieren. Außerdem können diese Eigenschaften über eine Optimierung der verwendeten Protokolle unterstützt werden. Im anschließenden Kapitel wird detaillierter auf entsprechende Methoden eingegangen.

### **3 Methoden zum Energiesparen**

#### **3.1 Bandbreitenreduzierung**

Die benötigte Bandbreite auf einem Link kann entsprechend der Auslastung über ein bestimmtes Zeitfenster angepasst werden. Die Anpassung der Bandbreite (Frequency Scaling) kann um den Faktor zehn erfolgen, also 10 Mb/s, 100 Mb/s, 1 Gb/s und 10 Gb/s etc., je nach vorhandenem Link. Denkbar wäre auch eine feinere Anpassung, dies wirft jedoch Fragen der Kompatibilität mit bestehenden Netzwerken auf. Die Bestimmung des Zeitfensters könnte automatisch entsprechend der benutzten Bandbreite bzw. Anzahl der bestehenden Verbindungen geschehen, um eine optimale Bandbreite zu gewährleisten und Verzögerungen bei der Datenübertragung möglichst gering zu halten. Das Umschalten zwischen den verschiedenen Bandbreiten sollte im einstelligen Millisekundenbereich liegen. Generell ist die mögliche Einsparung von Energie abhängig von der Auslastung auf einem Netzwerkklink. Neben dem angesprochenen Frequency Scaling ist auch eine zusätzliche Energieeinsparung über Dynamic Voltage Scaling (DVS) denkbar. Der Energiebedarf lässt sich quadratisch zur Betriebsfrequenz skalieren [10].

#### **3.2 Sleep-State von Netzwerkkomponenten**

Wie in modernen Prozessoren oder Mobilgeräten ist es denkbar, Teile der Netzwerkkomponenten in einen Sleep-State zu versetzen, der weniger Energie benötigt, wenn keine Last auf dem Link vorhanden ist.

Es muss möglich sein, das Interface über eingehende Pakete von einem Sleep-State in einen Active-State zu versetzen („Wake-on-Arrival“, WoA). Zudem sollte der Switch bzw. die Netzwerkkarte über entsprechend viel Speicher zum Puffern von Paketen verfügen, falls die Hardware Zeit benötigt, um den Sleep-State zu verlassen. In einem Multiport-Gerät, z. B. einem Switch, ist es wünschenswert, wenn einzelne Ports unabhängig voneinander in einen Sleep-State gebracht werden können, um die Energieeinsparung zu maximieren.

### 3.3 Einsparung im Vergleich

Wie Bild 6 zeigt, ist die Einsparung von Energie abhängig von der Auslastung des Links und bei den beiden Methoden unterschiedlich. Bei den Abbildungen wird von Hardware ohne Dynamic Voltage Scaling ausgegangen. Die jeweils erste Abbildung (Bild 6 u. 7) zeigt Hardware, bei der der Grundenergiebedarf gering ist und im Sleep-State deutlich weniger Energie als im Active-State benötigt. Die jeweils zweite Abbildung zeigt Hardware mit geringem Grundenergiebedarf, der Energiebedarf im Sleep- und Active-State unterscheidet sich nur geringfügig.

Wie zuvor festgestellt, wird bei steigender Auslastung mehr Energie benötigt. Es ist also naheliegend, dass die Methoden, um den Energiebedarf zu senken, bei höherer Last weniger effektiv sind.

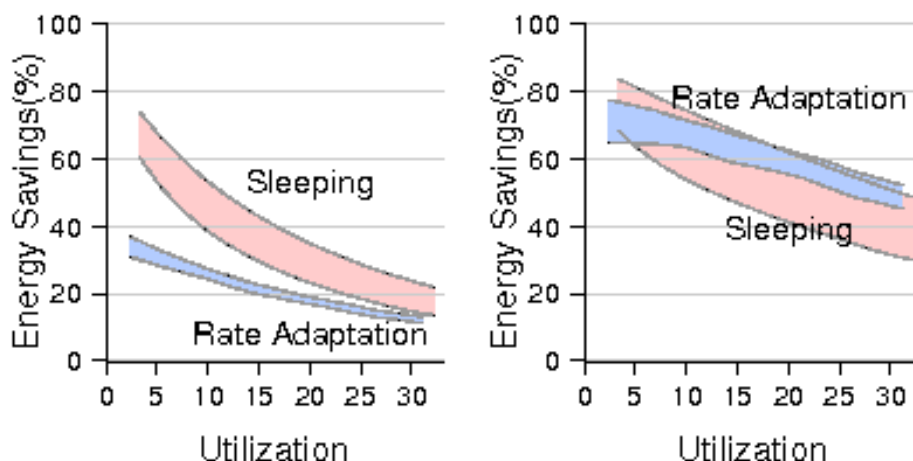


Bild 6: Energieeinsparung Bandbreitenanpassung/Sleeping, ohne DVS [2]



Bei der Variante mit DVS (s. Bild 7) gibt es einen Punkt, abhängig von der Auslastung, an dem die Bandbreitenanpassung eine größere Energieeinsparung als das Sleeping verspricht. Denkbar wäre eine Kombination aus beiden Methoden, je nach Beschaffenheit des Netzes, in dem der Energieverbrauch reduziert werden soll. Allgemein kann festgehalten werden, dass bei niedriger Auslastung (10-20%) der Energiebedarf bis um die Hälfte reduziert werden kann [2].

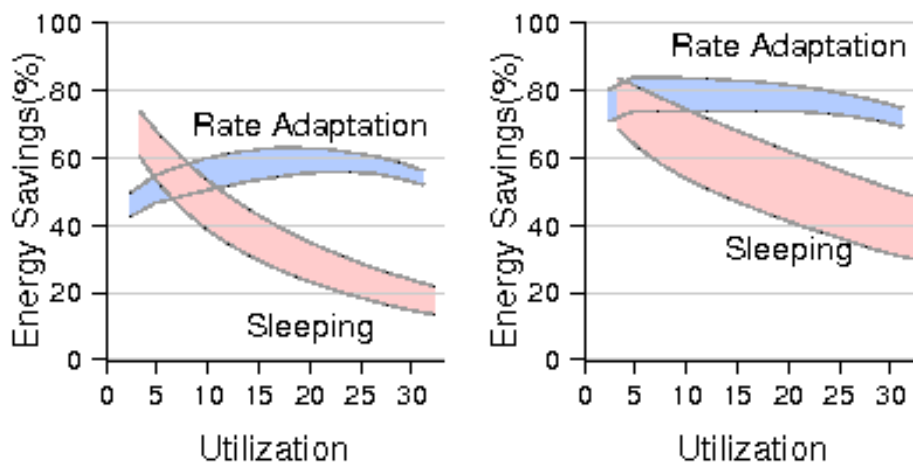


Bild 7: Energieeinsparung Bandbreitenanpassung/Sleeping, mit DVS [2]

### 3.4 Optimierung auf Protokollebene

Auf Protokollebene gibt es verschiedene Ansätze, Energie einzusparen. Im Wesentlichen zielen diese darauf ab, die vorher erwähnten Möglichkeiten der Bandbreitenanpassung und des Versetzens in einen Sleep-State, zu begünstigen. So können zunächst Pakete gepuffert werden und im Block über den Link geschickt werden. Es werden künstliche Bursts geschaffen („Buffer-and-Burst“, B&B). Damit kann die Hardware öfter in einen Sleep-State versetzt werden und die Bandbreite reduziert werden. Das Senden der Bursts kann in festgelegten Zeitfenstern geschehen, in der restlichen Zeit befinden sich die Netzwerkkomponenten in einem Sleep-State. Dies könnte noch über eine Sortierung der Datenpakete nach Empfänger optimiert werden, so können einzelne Ports auf einem Switch öfter in einen Sleep-State versetzt werden (s. Bild 8).

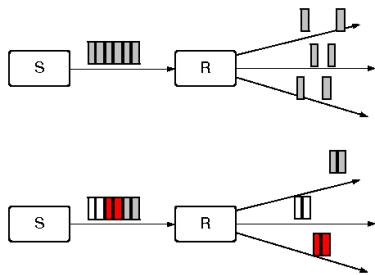


Bild 8: Bursts nach Empfänger unsortiert und sortiert [2]

Es können zudem gezielt Dienste von den Providern angeboten werden, um die genannten Methoden zu unterstützen. Generell wäre es wünschenswert, den Datenverkehr zu reduzieren, um Energie einzusparen. Dies kann z. B. durch den Einsatz von Multicast-Protokollen gerade bei bandbreitenintensiven Diensten wie Video- oder Audiostreaming erreicht werden. Aber auch der Einsatz von Kompressionsverfahren kann die Last bei der Datenübertragung reduzieren.

### 3.5 Probleme

Das Ändern der Bandbreite benötigt Zeit. Entsprechend sind Verzögerungen hinzunehmen, wenn die Last auf einem Link ansteigt und die Bandbreite erhöht werden muss. Auch wenn sich Teile der Netzwerkkomponenten in einem Sleep-State befinden, kommt es zu Verzögerungen, da diese aktiviert werden müssen. Es kann zu Paketverlusten kommen, wenn sich die Hardware in einem Übergangszustand befindet, d. h. wenn die Bandbreite gewechselt oder vom Sleep- in den Active-State gewechselt wird. Die Daten müssen erneut gesendet werden und es kommt somit zu Verzögerungen. Ähnliches gilt für eine Optimierung auf Protokollebene. Die Daten werden gepuffert, um die vorgestellten Methoden zu begünstigen. Auch hier tritt eine Verzögerung bei der Datenübertragung auf. Bei ständig stark belasteten Links fällt die Möglichkeit der Reduktion des Energiebedarfs eher gering aus.

## 4 Fazit

Je mehr Last auf einem Netzwerkknoten vorhanden ist, desto mehr Energie wird benötigt. Dies gilt ebenso für ansteigende Bandbreiten. Es hat sich jedoch gezeigt, dass Netzwerklinks meist nur wenig ausgelastet sind und es nur gelegentlich zu Bursts kommt. Daher liegt es nahe, diese zu nutzen, um den Stromverbrauch zu reduzieren.

Ein Ethernet-Interface verbraucht bei einer Bandbreite von 100 Mb/s bis 1 Gb/s 2-4 Watt, bei einem 10 Gb/s Link liegt der Verbrauch bei 10-20 Watt [9]. Wenn alle Links entsprechend den vorgestellten Methoden umgerüstet werden, so sind das allein in den USA eine Einsparungen in Höhe von 200-300 Millionen Euro bei 100 Mb/s - 1 Gb/s-Netzwerklinks und 30-160 Millionen Euro bei 10 Gb/s-Netzwerklinks im Jahr [5]. Es ergibt sich also für Unternehmen ein nicht zu unterschätzender wirtschaftlicher Vorteil und die Umwelt wird geschont. Zudem darf nicht vergessen werden, dass dabei die Kosten für die Klimatisierung von Rechenzentren sinken, da weniger Hitze von den Netzwerkkomponenten abgegeben wird.

Wenn sich die Verzögerung bei der Übertragung von Daten durch die genannten Maßnahmen im einstelligen Millisekundenbereich befindet ist dies im Vergleich zur möglichen Einsparung zu verschmerzen und wird in den meisten Fällen in der Praxis nicht relevant sein.

## 5 Literaturverzeichnis

[1] L. Shang, L.-S. Peh, N. K. Jha. Dynamic Voltage Scaling with Links for Power Optimization of Interconnection Networks, *Proceedings of the 9th International Symposium on High-Performance Computer Architecture*, S. 91, 2003

[2] S. Nedeveschi, L. Popa, G. Iannaccone, S. Ratnasamy, D. Wetherall. Reducing network energy consumption via sleeping and rate-adaption, *Proceedings of USENIX NSDI*, April 2008

[3] J. Chabarek, J. Sommers, P. Barford, C. Estan, D. Tsang, S. Wright. Power Awareness in Network Design and Routing, *IEEE Infocom*, 2008

- [4] G. Ananthanarayanan, R. H. Katz. Greening the Switch. *Workshop on Power Aware Computing and Systems - USENIX*, Dezember 2008
- [5] H. Barrass, M. Bennett, W. W. Diab, D. Law, B. Nordman, G. Zimmerman. IEEE 802 Tutorial - Energy Efficient Ethernet, *IEEE 802 Plenary*, Juli 2007
- [6] B. Nordman. Energy Efficient Ethernet: Outstanding Questions, *IEEE 802 interim meeting*, Januar 2007
- [7] A. Odlyzko. Data Networks are Lightly Utilized, and Will Stay That Way, *Review of Network Economics*, Vol. 2, Nr. 3, S. 210-237, September 2003
- [8] R. Pang, M. Allman, M. Bennett, J. Lee, V. Paxson, B. Tierney. A First Look at Modern Enterprise Traffic, *Proceedings of IMC 2005*, Oktober 2005
- [9] C. Gunaratne, K. Christensen, et al. Managing Energy Consumption Costs in Desktop PCs and LAN Switches with Proxying, Split TCP Connections, and Scaling of Link Speed, *International Journal of Network Management*, Oktober 2005
- [10] B. Zhai, D. Blaauw, et al. Theoretical and practical limits of dynamic voltage scaling, *Design Automation Conference*, 2004
- [11] C. Gunaratne, K. Christensen, B. Nordman, S. Suen. *IEEE Transactions on Computers*, 2008