

Energy Efficient Ethernet in der Praxis

Sebastian Porombka¹, Gudrun Oevel²

Abstract: Der Beitrag untersucht die Fragestellung, zu welchen Energieeinsparungen die Verwendung des Protokolls Energy Efficient Ethernet (EEE) zusammen mit einer verbrauchsorientierten Optimierung der Anschlussgeschwindigkeit in einem typischen Campus-Netzwerks führen kann. Er zeigt, dass nach wie vor erhebliche Anstrengungen notwendig sind, um eine energie-effiziente Netzinfrastruktur zu implementieren.

Keywords: Studie, Netzwerk, Campus, Energieeinsparungen, Energy Efficient Ethernet, EEE, ALR, verbrauchsorientierte Optimierung

1 Einführung

Bei der Diskussion um Energieeinsparungen zur Stabilisierung des Weltklimas wird mittlerweile auch regelmäßig darauf hingewiesen, dass die zunehmende Vernetzung im Sinne der Stichpunkte „Always Online“ und „Internet of Things“ zu zusätzlichen Energiebedarf führt. Grundlegend dafür ist nicht nur die ständig wachsende Anzahl von Clients, sondern selbstverständlich auch der Energieverbrauch der dazugehörigen Netz-Infrastruktur [Ch08]. Für Hochschulen ist dieses Thema aber nicht nur auf der globalen politischen Ebene interessant, sondern auch ganz konkret vor dem Hintergrund von steigenden Anforderungen an die Infrastruktur bei maximal konstanten Finanzmitteln.

Im vom BMWi im Rahmen der Ausschreibung IT2GREEN (<http://www.it2green.de>) von Juni 2011 bis Mai 2014 geförderten Projekt GreenPAD (<http://www.green-pad.de>) haben sich die Autoren aus diesen Gründen intensiv mit dem Thema Energie-Management von Netzwerkkomponenten beschäftigt. Es konnte damals nachgewiesen werden [Oe14], dass Netzwerkkomponenten im Gegensatz zu Clients und Servern (noch) nicht energieeffizient betrieben werden können, da sie über keine lastabhängige Energie-Optimierung verfügen. Dazu wurde gezeigt, dass der Energieverbrauch beim Betrieb von Netzkomponenten auch wesentlich abhängig ist von der Belegung der Switches.

Der Energieverbrauch setzt sich zusammen aus einem festen Grundverbrauch und zusätzlich einem geschwindigkeitsabhängigen Verbrauch pro belegtem Port [OP12]. Der Grundverbrauch hängt von der gewählten Architektur und der verbauten Switches bzw. deren Netzteilen ab. Der Energieverbrauch am Port ist extrem von der konfigurierten, aber nicht von der tatsächlich genutzten, Geschwindigkeit abhängig. Als Quintessenz wurde in den Untersuchungen von 2012 [OP12] daher festgehalten, dass man Energie beim Betrieb von

¹ Universität Paderborn, Zentrum für Informations- und Medientechnologien (IMT), Warburger Straße 100, 33100 Paderborn, sebastian.porombka@uni-paderborn.de

² Universität Paderborn, Zentrum für Informations- und Medientechnologien (IMT), Warburger Straße 100, 33100 Paderborn, gudrun.oevel@uni-paderborn.de

Netzinfrastruktur derzeit nur einsparen kann, wenn man konsequent nur das in Betrieb nimmt (Gesamtarchitektur, Anzahl der Ports, Geschwindigkeit pro Port), was man wirklich braucht und Überkapazitäten strikt vermeidet. Als Anforderung an die Hersteller wurde damals gefordert

- Ports müssen einzeln abschaltbar sein.
- Maßnahmen, um Energie bei niedrigen Auslastungen zu sparen, müssen flächendeckend umgesetzt werden. Als Beispiel wurde der Standard 802.3az Energy Efficient Ethernet (EEE) genannt.

Die Einsparung durch Änderung der Architektur und Verzicht auf Überkapazitäten wurde in [OP12] ausführlich behandelt. Da es damals in der Fläche noch keine Switches und Clients mit EEE-Implementierung gab, konnten an dieser Stelle noch keine Vergleichsanalysen in der Praxis ermittelt werden. Auch heute ist EEE in der Fläche noch nicht angekommen, so dass im vorliegenden Bericht insbesondere die Nutzung des Access-Netzes analysiert und versucht wurde die Verbindungsgeschwindigkeiten nach Bedarf einzuschränken. Dieses Verfahren wird im Folgenden als verbrauchsorientierte Optimierung bezeichnet.

2 Energy Efficient Ethernet

Der Verbrauch an elektrischer Energie durch Informations- und Telekommunikationstechnologien (IKT) steigt stetig. [La12] [La13] Offensichtlich ist das einerseits durch die stetig engere Vernetzung sowie durch stetig steigenden Datenverkehr [Ci08] [St09] und höhere Verbindungsbandbreiten zu erklären. Weltweit betrachtet wurde 2012 von einem Energieverbrauch von 42TWh für drahtgebundene und drahtlose Büronetzwerke ausgegangen [La12], [LNB12] sowie stetiger Wachstum bei fast allen Gerätetypen beobachtet. Ausnahmen waren 10/100 Mbit Switches. Scheinbar wurden alte Geräte für neuere Bandbreitenanforderungen außer Betrieb genommen und durch neue Komponenten ersetzt. Um diesen Trend zu dämpfen hat die IEEE im November 2006 [Be07] eine Studiengruppe „Energy Efficient Ethernet Study Group (EEESG)“ einbestellt, die Wege erarbeiten soll, den Energieverbrauch von Netzwerkverbindungen zu verringern. Mehrere Studien zeigen, dass in üblichen Netzwerken (Büro / Server) die Netzwerkschnittstellen in der meisten Zeit inaktiv sind und in der Zeit die volle elektrische Leistung brauchen. Eine typische 1 Gigabit (Gbit) Schnittstelle an einem PC oder Server kostet 0,5W [Re11], eine 10-Gbit-Schnittstelle werden schon 5W [B.07] verbraucht. Studien berichten auch von durchschnittlichen Auslastungen zwischen 5% [No07] (Desktop) und 30-35% [St09] (Server). Auch bei stark ausgelasteten Backbone-Switches geht die Literatur von Auslastungen < 30% aus.

Mit diesen Annahmen ging Ende 2007 aus der EEESG die „IEEE P802.3az Energy Efficient Ethernet Task Force“ hervor. Sie baute auf die Vorarbeiten der EEESG auf und sollte schwerpunktmäßig neue Protokolle und Hardwarekomponenten entwickelt werden, die Energie in Zeiten sparen, in deren Netzwerkschnittstellen ungenutzt sind. Zwei Ideen wurden in der Taskforce beleuchtet. Die erste Idee war die aktuelle Datenübertragungsrate

nach dem Bedarf auszuhandeln. Ziel war es, den Effekt auszunutzen, dass Verbindungen mit niedriger Datenübertragungsrate auch einen niedrigeren Energiebedarf [GCN05][OP12] haben. Ist ein Übertragungskanal in der aktuellen ausgehandelten Verbindungsgeschwindigkeit unausgelastet, sollte eine niedrigere Datenrate ausgehandelt werden. Wird eine Verbindung ausgelastet, soll neu verhandelt werden. In der Forschung und in den Arbeiten der IEEE wird dieses Verfahren als „Adaptive Link Rate (ALR)“ [GCN05] [GC06] geführt. ALR könnte einfach implementiert werden, kränkelte aber an dem Problem, dass es bei der Neuverhandlung zu einem Ausfall der Verbindung von mehreren Sekunden [Br02] kommt. Es wurde an den Problemen gearbeitet [Ch10]. Schließlich wurde die Idee aber zu Gunsten der unten aufgeführten Lösung [NRW08] [Ha08] zurückgestellt. Unabhängig davon wurde an dem Themengebiet weiter geforscht. Bilal et al. publizierten 2012 eine umfangreiche Zusammenfassung der Forschungsstände in [Bi13].

Die Erweiterung, die durch den „IEEE 802.3az Standard“ entstanden ist, beschreib den neuen Zustand „Low Power Idle (LPI)“. Befindet sich eine Ethernet-Schnittstelle (PHY) in diesem Zustand, verbraucht diese nur noch einen Bruchteil der sonst notwendigen Energie. Je nach physikalischer Implementierung und ob die Betrachtung auf Client- oder Switch-Seite geschieht, liegen die Ersparnisse bei 60-90% [Re11] [LM09] [NRW08]. Schnittstellen, die sich im Zustand LPI befinden, können weder Daten senden noch empfangen. Um die Zustandsänderungen zwischen normalen Betrieb und LPI zu koordinieren, wurden im Standard Protokolle vereinbart, die es ermöglichen beide Teilnehmer abzustimmen. Wann die Zustandsänderungen passieren sollen, lässt der Standard offen. Hersteller können so selbstständig an den Algorithmen arbeiten, die diese Entscheidungen treffen und den störungsfreien Betrieb gegen die Energieersparnis abwägen.

Eine Energieersparnis lässt sich also mit LPI nur erreichen, wenn beide Teilnehmer den Standard implementieren. Kommunikationsmuster, die wenig Bandbreite verbrauchen, aber kontinuierlich die Leitung belegen, verhindern lange Einsätze von LPI und verringern dadurch die Energieersparnis. Solche Effekte können zwar mit Gegenmaßnahmen [Zh08] abgemildert werden, vermindern aber trotzdem die Einsparungen.

3 Methoden

Im Verlauf dieser Arbeit wird untersucht, welche zusätzlichen Einsparungen sich bei einer verbrauchsorientierten Optimierung im Sinne von Abschnitt 1 ergeben würden. Um die Idee aus der Standardisierung von 802.3az zur Einsparung von Energie durch Aushandeln der aktuell benötigten Portgeschwindigkeit auf ihre Relevanz zu untersuchen, wird folgender Ansatz gewählt:

1. Ports und deren Teilnehmer im Netzwerk beobachten und maximale gebrauchte Geschwindigkeit ermitteln,
2. Verbindungsgeschwindigkeit auf Switch-Seite entsprechend drosseln,
3. periodische Beobachtung der Entwicklung.

4. Erst wenn ein Port doch überlastet ist, eine höhere Verbindungsgeschwindigkeit freischalten, und diese merken.

Betrachtet werden nur Access-Ports, an die Endgeräte wie z.B. Computer, Telefone, Accesspoints angeschlossen sind. Verbindungen im Core-Bereich und im Rechenzentrum werden nicht angetastet. Anschlüsse werden zwischen 1 Gbit und 100 Mbit verhandelt. Zur Modellierung der Effekte einer solchen Geschwindigkeitsbegrenzung wurden zwei extreme Szenarien evaluiert:

- Szenario A: Die Auslastung des Vortages wird betrachtet. Hat sie den ganzen Tag die 5% nicht überschritten, wird für 24 Stunden eine Grundeinstellung von 100 Mbit eingestellt. Ansonsten wird frei verhandelt.
- Szenario B: Für jede Stunde am Tag wird die maximal nötige Geschwindigkeit durch die 5%-Regel bestimmt. Die Verbindungsgeschwindigkeit wird in diesen Stunden auf 100 Mbit gedrosselt.

Bei der Umsetzung in die Praxis werden mit diesem Ansatz bewusst folgende Einschränkungen in der Dienstqualität hingenommen: Netzausfall bei „Neuaushandlung“, wenn die Voreinstellung nicht passte, sowie Änderungen in der Verbindungs-Latenz. Neben der Energieersparnis, hat die Umsetzung folgende positive Nebeneffekte: Access Ports bekommen die Verbindungsgeschwindigkeiten, die eher an die Realität angepasst sind. Es ermöglicht eine verbrauchsorientierte Langzeit-Planung.

4 Ausgangssituation

Bei den Projektergebnissen aus GreenPAD hatte sich gezeigt, dass vollbelegte Switches pro Port energieeffizienter sind als nur teilbelegte Switches. Es stellt sich daher die Frage, wie viele Switchports in einer Netzinfrastruktur tatsächlich in Benutzung sind. Diese Frage ist auch beim Einsatz von EEE von zentraler Bedeutung.

Als Fallbeispiel demonstrieren wir ein typisches Bürogebäude, Bauteil O, an der Universität Paderborn, in dem Teile der Informatik mit hohen Anforderungen an die Netzinfrastruktur untergebracht sind. In jedem Mitarbeiterbüro im Bauteil O sind acht Netzwerkanschlüsse für im Schnitt zwei Mitarbeiter verlegt worden. Davon werden in der Regel zwei Anschlüsse für zwei VoIP Telefone und zwei weitere Anschlüsse für Notebook oder PC gebraucht. Der Rest ist für spätere Anforderungen, Drucker und weitere Computer vorgesehen. Diese Anschlüsse sind bereits auf Switches rangiert und üblicherweise auch schon in das passende Netz geschaltet und tauchen in der folgenden Darstellung als „nicht verbunden“ auf.

Diese Vorgehensweise hat im Betrieb den Vorteil, dass neue Netzanforderungen (z.B. neue Dose in Betrieb nehmen, Umschaltung in ein anderes VLAN) per Konfiguration auf den aktiven Komponenten vorgenommen werden können ohne dass ein Techniker vor Ort erscheinen muss. Um die tatsächliche Nutzung der Switchports zu erfassen, wurde zyklisch der Zustand aller Switchports gespeichert und ausgewertet.

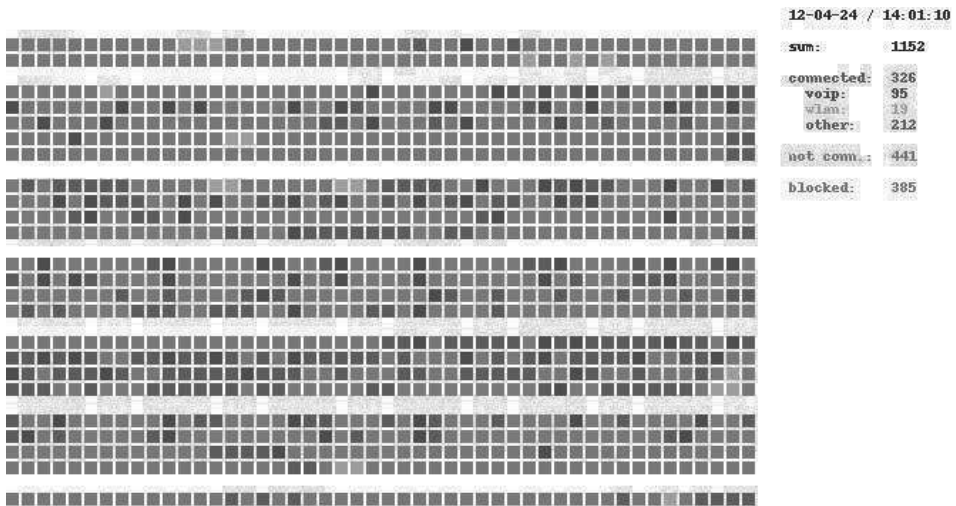


Abb. 1: Verwendung der Anschlüsse im Gebäude O während der Arbeitszeit

Abbildung 1 schlüsselt eine typische Verwendung der Switchports zur Mittagszeit auf. In diesem Moment wurden an 1.152 aufgelegten Anschlüssen 95 VoIP Telefone, 19 Access-points und 215 andere Geräte mit Netzwerk versorgt. Dazu gehören die PCs und Notebooks der Mitarbeiter, ein experimentelles Sensor-Netz, Drucker und andere Geräte. 438 Anschlüsse sind zwar für ein VLAN geschaltet, aber nicht verbunden. Die restlichen 385 Anschlüsse sind auf aktiven Komponenten gepatcht, aber deaktiviert. Grob gesprochen sind also von den insgesamt 1.152 Ports knapp 1/3 genutzt, ein weiteres knappes 1/3 für die Nutzung direkt vorbereitet und das restliche Drittel vorhanden, aber ungenutzt.

Abbildung 2 ist eine Momentaufnahme aus der Nacht. Offensichtlich haben (nur!) 37 Anschlüsse ihr Endgerät verloren. 178 Geräte sind noch am Netz, davon bereits abgezogen WLAN Accesspoints und VoIP Telefone. Knapp 10 Geräte haben, wahrscheinlich durch Standby-Zustände, ihre Verbindungsgeschwindigkeit auf 10 oder 100 MBit gesenkt, sind aber weiterhin online und warten darauf wieder aufgeweckt zu werden. 47 der 178 Geräte gehören zu einem experimentellen Sensor-Netz. Der Rest teilt sich auf Drucker, Mitarbeiter-Computer und Laboraufbauten auf.

Das Ergebnis überrascht, weil wir von der Arbeitshypothese ausgegangen sind, dass fast jeder Switchport, der von einem PC oder Laptop genutzt wird, nachts am Switch als inaktiv gesehen wird und entsprechend zum Stromsparen genutzt werden kann. Um im nächsten Schritt zu untersuchen, wie sich die Situation auf dem gesamten Campus darstellt, wurden alle Switchports im Abstand von 60 Sekunden an den Netzwerk-Switchen auf ihre Auslastung hin abgefragt. Durch den Vergleich mit der letzten Messung wird ein durchschnittlicher Bandbreitenverbrauch berechnet. Der Tag wird in Intervalle von 15 Minuten eingeteilt und die jeweils höchste Auslastung für jeden Switchport auf dem Campus in diesem Zeitraum vermerkt. Die Maximal-Werte im Viertelstunden-Intervall werden im Folgenden als Bandbreitennutzung bezeichnet. Anschlüsse, die mit 10 Mbit oder 100 Mbit

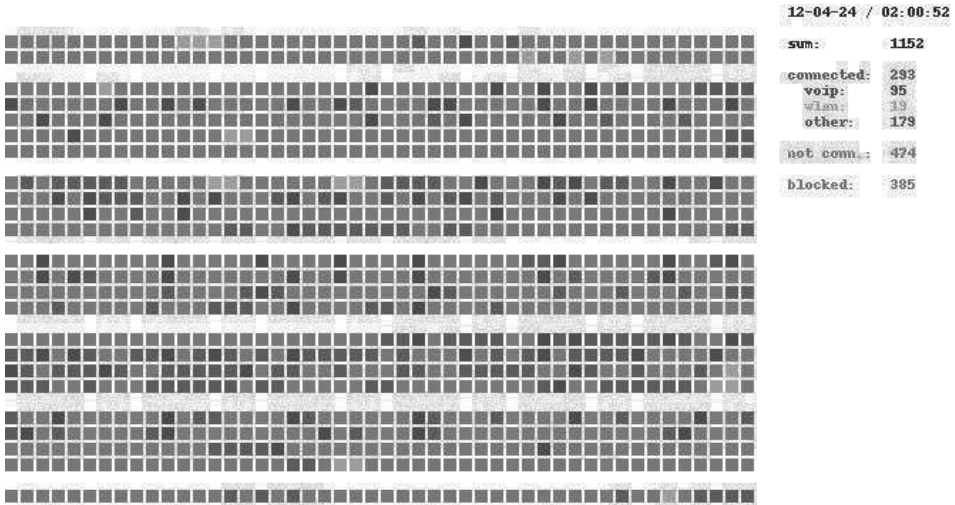


Abb. 2: Verwendung der Anschlüsse im Gebäude O in der Nacht

verbunden sind, betrachten wir als energetisch gleichwüdig genug um sie in eine Klasse für 100 Mbit einzusortieren.

Eine typische Auslastungssituation an einem Tag zeigt Abbildung 3. Aufgetragen sind alle Anschlüsse im Core-, Gebäude- und Access-Bereich. Ausgelassen sind alle Anschlüsse, die sich im Bereich des Rechenzentrums befinden. Neben den benutzten Bandbreiten sind ebenfalls die Zustände „shutdown“ und „notconnected“ verzeichnet. Ersteres beschreibt einen Anschluss, der administrativ durch die Verwaltung abgeschaltet ist und nicht benutzt werden kann. Als „notconnected“ wurden die Anschlüsse erfasst, die bereits einem Netz zugeordnet wurden und potentiell nutzbar sind. Allerdings befand sich zum Zeitpunkt der Messung kein Endgerät an dem Anschluss. In diesem Zustand befinden sich über den Tag zwischen 67% und 70% der Anschlüsse auf dem Campus.

Abbildung 4 schränkt die Sicht auf die reinen Access-Ports für Endgeräte ein, die auch aktuell verbunden sind. Neu hinzugekommene Ports sind meist per 1Gbit angeschlossen, die meisten davon mit einer Bandbreitennutzung < 5 Mbit. Eine Teilmenge der Anschlüsse, die mit 10/100 Mbit verbunden waren, verschwinden über den Arbeitstag. Es besteht die Vermutung, dass es sich hierbei um PCs oder Laptops handelt, die sich im Standby befinden und auf ein Wake-on-Lan-Signal warten.

Insgesamt muss in der Fläche, wie Abbildung 3 belegt, konstatiert werden, dass die Anschlussgeschwindigkeit deutlich überprovisioniert ist und fast alle Clients maximal 1% davon nutzen. Die meisten Ports sind aufgelegt, aber nicht in Nutzung. Im Tagesverlauf steigt die Anzahl der genutzten Ports, allerdings nicht signifikant. Auch hier zeigt sich also, dass die Implementierung von EEE zu erheblichen Einsparungen führen kann. Dies kann allerdings erst dann komplett umgesetzt werden, wenn alle Geräte, Switches und Clients den Standard 802.3az unterstützen.

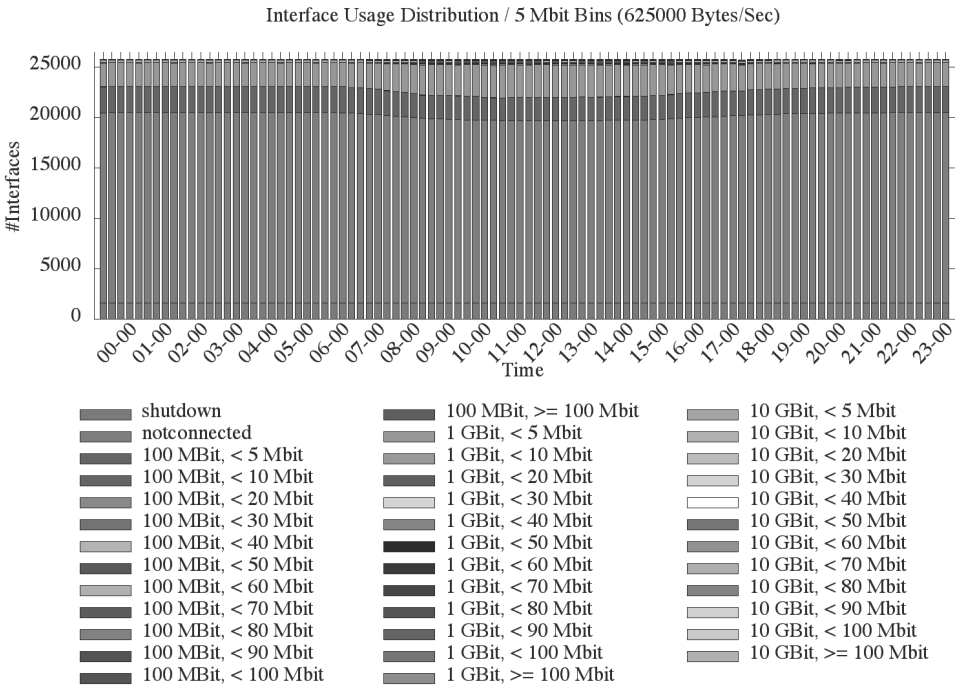


Abb. 3: Auslastung des gesamten Netzwerks über einen Tag

Dies führt zu der Fragestellung, welche Energie-Einsparungen man heute durch geschicktes verbrauchsorientiertes Provisionieren erzielen kann.

5 Einsparmöglichkeiten

Um diese Fragestellung zu eruieren, muss man zunächst wissen, welche Netzinfrastruktur im Einsatz ist und welche Effekte eine Änderung der Portgeschwindigkeit hat. Es erfolgt daher ein Überblick über die eingesetzten Geräte sowie deren Verhalten bzgl. Energieverbrauch.

Das Campus-Netz der Universität Paderborn, dessen Design an das „hierarchische Inter-networking-Modell“ [Ci14] angelehnt ist, besteht aus den Bereichen „Core“, „Distribution“ und „Access“. „Core“ und „Distribution“ bilden das Grundgerüst des Netzes. In den Bereich „Access“ allen alle Komponenten, an die Endgeräte angeschlossen werden. Alle Switches im Bereich „Access“ wurden bei der letzten großen Modernisierung 2012 bis 2014 von der Firma Cisco gekauft. Aus der Produktpalette wurden modulare Switches der Baureihe Catalyst 45xx oder einzelne Geräte der Baureihe Catalyst 3560 gewählt. 77% der Switches im Access-Bereich fallen auf die Fabrikate WS-C4506-E, WS-C3560G-48PS und WS-C3560G-48TS sind. Die anderen 23% sind alte Switches, die sich in der

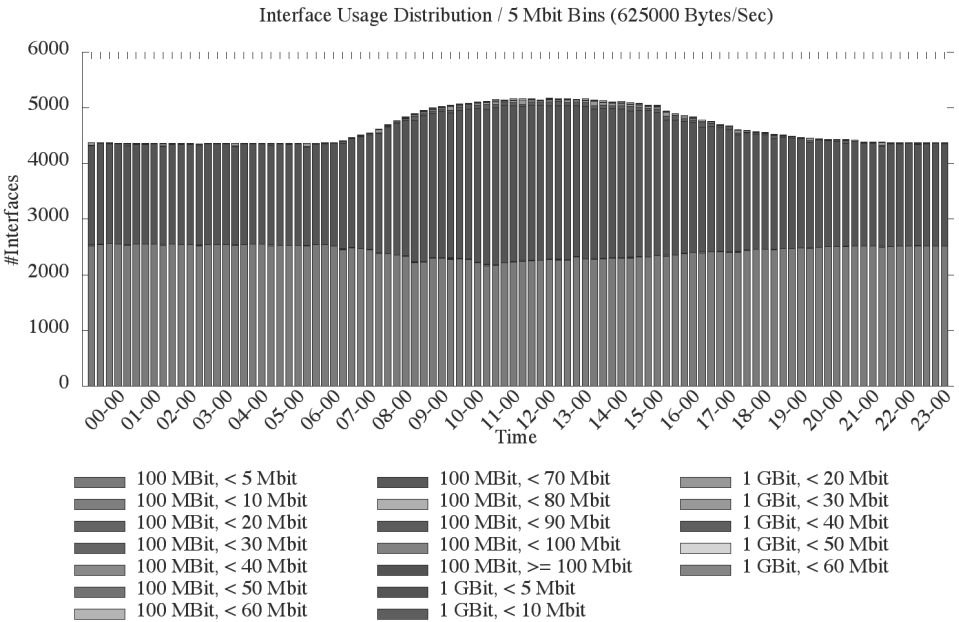


Abb. 4: Auslastung des gesamten Netzwerks über eine Tag, Eingeschränkt auf Accessports

Ablösung befinden. Die genannten 77% stellen 90% der Ports bereit. Deshalb wurden diese Fabrikate genauer untersucht und als Ziel für eine verbrauchsorientierte Optimierung genommen. Alle drei Fabrikate unterstützen im aktuellen Ausbau kein EEE. Sie wurden auf ihren Energieverbrauch in typischen Lastsituation (Belegung und Netzwerklast, siehe [OP12]) ausgemessen und zeigen als Ergebnis keine signifikante Abhängigkeit in der Energieaufnahme von der Auslastung, allerdings von der Portbelegung. Insgesamt stellen die so erhaltenen Ergebnisse die Berechnungsgrundlage zur Bewertung möglicher Einsparungspotentiale dar. Nach der großen Modernisierung wurden die neuen Catalyst 2960-x eingeführt, die nun als Ersatz für die 3560 in weiteren Modernisierungen eingesetzt werden. Ebenfalls gilt es zu prüfen, ob vielleicht Stacks aus Catalyst 2960-x als Ersatz für große Catalyst 45xx Monolithen vorstellbar sind. Diese wurden daher als Ergänzung zu [OP12] vermessen (Abbildung 5).

In Einklang mit den Herstellerangaben zeigen unsere Messungen, dass der Energieverbrauch im Vergleich zur Catalyst 3560 Serie deutlich reduziert ist. Auch identifiziert man einen Unterschied ob Endgeräte mit EEE oder ohne EEE angeschlossen werden. Man erkennt hier deutlich einen Trend in die Richtung energieeffizienter Netzwerkkomponenten. Allerdings ist es nur langfristig möglich den aktuellen Ausbau mit neuen Komponenten zu tauschen. Deshalb muss versucht werden in der aktuell vorherrschenden Infrastruktur kurz- bis mittelfristig Energie und damit die laufenden Kosten zu sparen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde der Versuch zur verbrauchsorientierten Optimierung durch das Aushandeln der Bandbreite abhängig vom Verbrauch, wird in dieser Arbeit in zwei verschiedene

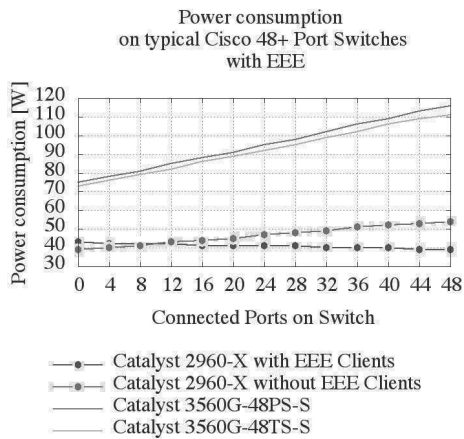


Abb. 5: Energieverbrauch Catalyst 2960-x, mit und ohne EEE kompatiblen Endgeräten

Varianten erprobt. Hierbei handelt es sich um sehr einfache Heuristiken, die ausgewählt wurden, um schnell einen Überblick über die möglichen Energiesparpotentiale zu ergattern.

Szenario A: Aus den Beobachtungen eines Anschlusses wird für 24 Stunden eine voraussichtlich maximal benötigte Verbindungsgeschwindigkeit berechnet und als maximal verhandelbare Geschwindigkeit auf der Switchseite gesetzt. Wird beobachtet, dass mit der niedrigeren Verbindungsgeschwindigkeit eine Auslastung von mehr als 5% besteht, wird diese Restriktion gelockert und eine schnellere Verbindung ausgehandelt. In diesem Moment gibt es einen Verbindungsausfall. Sinn ist es, Geräte mit durchgängig niedrigen Anforderungen auf eine niedrigere Verbindungsgeschwindigkeit, und damit auf einen niedrigeren Grundverbrauch pro Port, herunterzuhandeln. Wir versuchen hiermit Teilnehmer mit sehr niedrigen Anforderungen zu identifizieren. Beispiele sind klassische Büro-Arbeitsplätze, Türterminals, Sensornetze, VoIP-Telefone usw. Im Falle einer plötzlichen Änderung des Verhaltens wird die Verschlechterung der Dienstgüte durch den Ausfall in Kauf genommen.

Szenario B: Ähnlich zu Szenario A. Allerdings wird für jede Stunde am Tag eine Voraussage getroffen, welche Verbindungsgeschwindigkeit nötig ist. Eine so genaue Vorhersage für ein Verhalten zu treffen ist relativ unwahrscheinlich. Auch macht es wahrscheinlich wenig Sinn, stündlich die Verbindung neu zu verhandeln und damit immer Ausfälle zu verursachen. Trotzdem hilft es als theoretisches Modell ein Gefühl für die Grenzen des Energiesparpotentials zu bekommen. Beide Varianten wurden in einer Simulation modelliert und wurden an einem Tag gegeneinander gerechnet.

Abbildung 6 zeigt das Ergebnis der Simulation von verbrauchsorientierter Optimierung der Portgeschwindigkeit auf den realen Daten an der Universität Paderborn. Aufgetragen sind jeweils Minimum und Maximum zu einem Zeitpunkt. Der zu erwartende reale Verbrauch liegt irgendwo zwischen den Kurven. Die rote und grüne Kurve bezieht sich auf

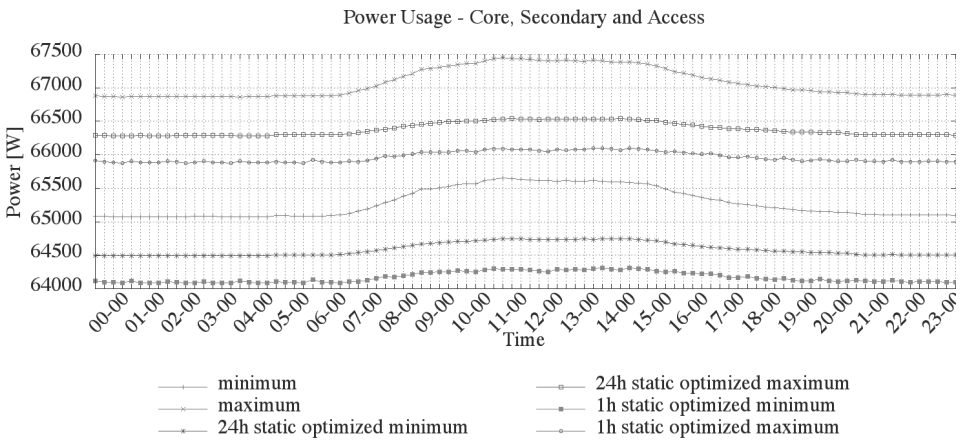


Abb. 6: Ergebnis der verbrauchsorientierten Optimierung

den Verbrauch ohne Optimierung. Die blaue und die lila Kurve zeigen die Ersparnis durch die Festlegung einer ganztägigen Beschränkung. Die hellblaue und braune Kurve visualisieren eine stündliche Anpassung auf Basis bekannter statistischer Werte. Sie bilden hier die erwähnte untere Schranke für den minimalen und maximalen Energieverbrauch. Es zeigt sich hier, dass eine verbrauchsorientierte Optimierung der Ports mit einer einfachen Heuristik – eine Größenordnung von 1.200 bis 1.800 Watt, das entspricht in etwa 50% des tatsächlich portabhängigen Verbrauchs – einsparen kann. Interessant ist auch der flachere Anstieg der Verbrauchskurve, was zur Stabilisierung der Stromnetze beitragen könnte.

6 Zusammenfassung und Fazit

Im Mittelpunkt des Beitrags stand die Frage nach der Implementierung von energieeffizienten Netzinfrastrukturen. Es konnte am realen Fallbeispiel der Universität Paderborn nachgewiesen werden, dass der Einsatz von Energy Efficient Ethernet (EEE) zu einer Senkung des Energieverbrauchs führen wird. Energetisch problematisch bleiben weiterhin die klassische Überprovisionierung beim Vorhalten von Ports und deren Anschlussgeschwindigkeit. Hier kann eine verbrauchsorientierte Optimierung heute insbesondere dabei helfen, Lastspitzen zu dämpfen. Insgesamt bleibt die energie-effiziente Implementierung von Netzinfrastruktur immer noch eine Herausforderung. Es könnte, z.B. in gut durchdachten Randfällen, ein bereits vorhandenes drahtloses Funknetz für kurzfristige Anforderungen oder Anwendungen mit geringen Bedarfen an Bandbreiten genutzt werden. Auch ist in dieser Arbeit nicht zwischen verschiedenen Verwendungszwecken von Gebäuden und Bereichen differenziert. So könnte es sein, dass es zwischen eher klassischen Bürogebäuden und Maschinenhallen unterschiedliche Verhaltensmuster gibt. Techniken aus dem Bereich SDN könnten helfen Ausfallzeiten im Moment der Neuverhandlung zu verhindern.

Literaturverzeichnis

- [B.07] B. Kohl: 10GBASE-T Power Overview (Today). Energy Efficient Ethernet Study Group presentation material March 13-15, (March), 2007.
- [Be07] Bennett, Mike: , IEEE 802.3 Energy Efficient Ethernet Study Group - Agenda and General Information, 2007.
- [Bi13] Bilal, Kashif; Khan, Samee U.; Madani, Sajjad A.; Hayat, Khizar; Khan, Majid I.; Min-Allah, Nasro; Kolodziej, Joanna; Wang, Lizhe; Zeadally, Sherali; Chen, Dan: A survey on Green communications using Adaptive Link Rate. *Cluster Computing*, 16(3):575–589, 2013.
- [Br02] Brown, Kevin: , 10/100/1000 Link Timing, 2002.
- [Ch08] Chabarek, J; Sommers, J; Barford, P; Estan, C; Tsiang, D; Wright, S: Power Awareness in Network Design and Routing. Proc. of the 27th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2008), S. 457–465, 2008.
- [Ch10] Christensen, Ken; Reviriego, Pedro; Nordman, Bruce; Bennett, Michael; Mostowfi, Mehrgan; Maestro, Juan: IEEE 802.3az: The road to energy efficient Ethernet. *IEEE Communications Magazine*, 48(11):50–56, 2010.
- [Ci08] Cisco: Approaching the Zettabyte Era. White Paper, S. 23, 2008.
- [Ci14] Cisco: Connecting Networks Companion Guide. 2014.
- [GC06] Gunaratne, Chamara; Christensen, Ken: Ethernet adaptive link rate: System design and performance evaluation. Proceedings - Conference on Local Computer Networks, LCN, S. 28–35, 2006.
- [GCN05] Gunaratne, Chamara; Christensen, Ken; Nordman, Bruce: 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*, 15(5):297–310, 2005.
- [Ha08] Hays, R.: Active / idle toggling with low-power idle. IEEE 802.3az Task Force Meeting, (January):1–15, 2008.
- [La12] Lambert, Sofie; Van Heddeghem, Ward; Vereecken, Willem; Lannoo, Bart; Colle, Didier; Pickavet, Mario: Worldwide electricity consumption of communication networks. *Optics express*, 20(26):B513–24, 2012.
- [La13] Lannoo, Bart: Energy Consumption of ICT Networks. TREND Final Workshop, 2013.
- [LM09] Larrabeiti, D; Maestro, J A: Performance Evaluation of Energy Efficient Ethernet. 13(9):697–699, 2009.
- [LNB12] Lanzisera, Steven; Nordman, Bruce; Brown, Richard E.: Data network equipment energy use and savings potential in buildings. *Energy Efficiency*, 5(2):149–162, 2012.
- [No07] Nordman, Bruce: , EEE Savings Estimates, 2007.
- [NRW08] Nedeveschi, Sergiu; Ratnasamy, Sylvia; Wetherall, David: Reducing Network Energy Consumption via Sleeping and Rate-Adaptation. S. 323–336, 2008.
- [Oe14] Oevel, Gudrun: Abschlussbericht für das Projekt GreenPAD. Bericht, 2014.

- [OP12] Oevel, Gudrun; Porombka, Sebastian: Zwischenbericht für das Projekt GreenPAD AP 1.3 - Energie-Management: Netzkomponenten. Bericht, 2012.
- [Re11] Reviriego, P.; Christensen, K.; Rabanillo, J.; Maestro, J. A.: An initial evaluation of energy efficient ethernet. *IEEE Communications Letters*, 15(5):578–580, 2011.
- [St09] Stobbe, Lutz; Nissen, Ing Nils F; Proske, Marina; Middendorf, Dipl Ing Andreas; Schloemann, Dipl Volksw Barbara; Friedewald, Michael; Georgieff, Dipl Volksw Peter; Leimbach, Timo: Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft. *Computing*, 7:178, 2009.
- [Zh08] Zhang, Baoke Zhang Baoke; Sabhanatarajan, K.; Gordon-Ross, a.; George, a.: Real-time performance analysis of Adaptive Link Rate. 2008 33rd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN), S. 282–288, 2008.