

Energieeffizienz im WLAN

Maximilian Boehner, Sebastian Porombka, Gudrun Oevel

Universität Paderborn
Warburger Str. 100
33098 Paderborn
mboehner@mail.upb.de
sebastian.porombka@upb.de
gudrun.oevel@upb.de

Abstract: Obwohl der Energieverbrauch in WLAN-Infrastrukturen weltweit steigt, sind nur wenige Ansätze zur Optimierung ihrer Energieeffizienz bekannt. Ausgehend von der WLAN-Installation an der Universität Paderborn, wird zunächst eine genaue Analyse des IST-Zustands vorgenommen, um Potentiale zu entdecken und Metriken zu definieren. Anschließend werden verschiedene Strategien zur Senkung des Energieverbrauchs diskutiert. Zwei neu entwickelte Algorithmen zum Resource-on-Demand-Betrieb von Access Points werden vorgestellt und bewertet. Insgesamt zeigt sich, dass erhebliche Energieeinsparungen möglich sind, ohne signifikant auf Dienstgüte verzichten zu müssen.

1 Einleitung

GreenIT als Schlagwort kennzeichnet für große Organisationen die Herausforderung, einerseits stark wachsende IT-Infrastrukturen bereitzustellen, andererseits aber auch die Energiekosten im Auge zu behalten. Dies gilt insbesondere auch für den kabellosen Zugang zum Netzwerk (Funknetz, WLAN). Größere WLAN-Infrastrukturen werden wie viele IT-Komponenten deutlich überprovisioniert, um ausreichend Reserven für Leistungsspitzen vorzuhalten. Diese werden aber nur selten benötigt ([Ja07]), sodass die meiste Zeit große Teile der Infrastruktur nicht oder nur wenig ausgelastet sind. Die Untersuchungen von Lanzisera u. a. [La12] zeigen, dass im Jahr 2012 WLAN-Infrastrukturen im Enterprise-Umfeld weltweit mit 2,3 TWh Stromverbrauch zu Buche schlagen. Das macht etwa 2 % des Energieverbrauchs aller Netzwerkkomponenten weltweit aus. Für eine Infrastruktur auf einem Flächengelände wird der anteilige Verbrauch dort mit 5 % angegeben. Gleichzeitig wachsen WLAN-Infrastrukturen um 32 % jährlich ([Ja09]), sodass dem Thema Energieeffizienz auch im WLAN eine nicht unbedeutende Rolle zukommt.

Der naheliegende Ansatz, Teile der unbenutzten Infrastruktur abzuschalten und nur bei Bedarf hochzufahren, steht grundsätzlich im Widerspruch zu der Erwartung der Nutzerinnen und Nutzer, zu jeder Zeit immer vollen und verzögerungsfreien Zugriff auf

das Netzwerk zu haben. Bei der Optimierung des Energieverbrauchs ist daher das Thema der Dienstgüte stets mit im Auge zu behalten.

Ziel dieses Artikels ist es, Strategien für den energieeffizienten Betrieb größerer WLAN-Infrastrukturen auf einem Flächengelände, wie sie bspw. in Bürogebäuden oder auf einem Universitätscampus zu finden sind, bei gleichzeitiger Wahrung der Dienstgüte aufzuzeigen. Am Beispiel der Universität Paderborn wird der IST-Zustand des WLANs bezüglich Last und Energieverbrauch analysiert, um Optimierungspotentiale zu finden und sinnvolle Metriken als Vergleichsgrößen zu identifizieren. Drei unterschiedliche Resource-on-Demand-Algorithmen für den lastabhängigen Betrieb von Access Points werden zur Umsetzung der vorgeschlagenen Strategien vorgestellt und bewertet. Prototypisch werden die Algorithmen auf das WLAN der Universität Paderborn angewendet und der Energieverbrauch sowie die Dienstgüte analysiert. Als Hauptergebnis wird gezeigt, dass die Kombination von unterschiedlichen Betriebsalgorithmen zu unterschiedlichen Zeiten ohne Verlust von Dienstgüte eine Energieeinsparung von 15 % ermöglicht.

Die vorgestellten Strategien, Metriken und Algorithmen sind leicht auf den Betrieb anderer WLAN-Infrastrukturen übertragbar. Sie könnten zusätzlich von Herstellern auch direkt in zukünftige WLAN-Technologien integriert werden.

2 Grundlagen

Für das Design und den Betrieb von energieeffizienten WLAN-Infrastrukturen ist es notwendig, sich mit den wichtigsten technischen Eigenschaften der involvierten Komponenten und den physikalischen Zusammenhängen und Effekten auseinanderzusetzen. Dieser Abschnitt gibt einen kurzen Überblick über die wichtigsten Aspekte für die nachfolgenden Kapitel.

Alle erwähnten Informationen betrachten drahtlose Netzwerke nach IEEE 802.11-Standard [Ie12] im Infrastruktur-Modus. Der ebenso spezifizierte Ad-Hoc-Modus verhält sich ähnlich, ist aber nicht Gegenstand dieses Artikels.

Wichtige Akteure in diesen Netzen sind die Komponenten zur zentralen Steuerung und zur Erzeugung einer Infrastruktur, die in der Summe als *Distribution System* (DS) [Re06] bezeichnet werden. Ein DS besteht üblicherweise aus einem oder mehreren *Access Points* (AP), die den Zugangspunkt für Endgeräte (*Mobile Stations* (MS)) bereitstellen. Logische Modellkonstruktionen von 802.11 WLAN-Netzen im Infrastruktur-Modus sind das *Basic Service Set* (BSS), auch als *Zelle* (Cell) bekannt, das alle MS verbunden auf einen AP (inkl. diesem) zusammenfasst, sowie das *Extended Service Set* (ESS), das alle Zellen – und damit auch ihre MS – desselben Netzwerks zusammenfasst. Identifiziert wird ein BSS/ESS durch den *Service Set Identifier* (SSID).

Beim Verbindungsaufbau zu einer WLAN-Infrastruktur sucht die MS anhand einer vorgegebenen SSID nach erreichbaren Zugangspunkten des BSS/ESS und verbindet sich

daraufhin, je nach Implementierung, mit dem Access Point, der mit der höchsten Empfangsqualität (überwiegend SNR, im Folgenden erklärt) empfangen wird.

Die Datenübertragung in drahtlosen Netzwerken nach IEEE 802.11 erfolgt mittels elektromagnetischer Wellen. Dabei interessieren in dieser Arbeit weniger die Verfahren oder die Implementierung, sondern einige Grundlagen in der Signalausbreitung und die Metriken zur Bestimmung der Signalqualität einer Verbindung. Ein einfaches Modell beschreibt Signalstärke als Funktion aus Sendeleistung und Entfernung und geht davon aus, dass sich Sender und Empfänger im freien Raum ohne einschränkende Elemente befinden [Sc05]. In der realen Welt tritt dieser Fall allerdings nahezu nie auf und Funkverbindungen werden u. a. durch Fading, Störungen und Interferenzen gestört [Ku08].

Als Mittel, um Signalqualitäten unter der Beschränkung von Noise und Fading zu beschreiben, kann die Kennzahl *Signal to Noise Ratio* (SNR) benutzt werden. Sollen ebenso Interferenzen berücksichtigt werden, wird von *Signal to Interference and Noise Ratio* (SINR) gesprochen. SNR und SINR können zur Abschätzung der *Bitfehlerrate* (*Bit Error Rate*, BER) benutzt werden, die eine Wahrscheinlichkeit angibt, dass beim Empfänger ein Fehler bei der Extrahierung der empfangenen Daten aus dem Funksignal auftritt [Ku08]. Höhere SNR und SINR sind Anhaltspunkte für niedrigen BER und damit eine zuverlässigere Verbindung. Für gegebene SNR oder SINR hängt die BER ebenso von der Datenrate der Übertragung ab. Höhere Datenraten sind anfälliger für Fehler. Sender-Empfänger-Paare können also auch bei geringen SNR bzw. SINR eine stabile Verbindung durch eine niedrige Datenrate beständig aufrechterhalten [Re06].

Eine im Weiteren verwendete Größe ist die *Received Signal Strength Indication* (RSSI) [Sa10]. Die Kennzahl beschreibt die Verbindungsqualität zwischen Geräten in einem Funknetz. Als Skala wird je nach Quelle eine Ganzzahl zwischen 0 und 255 [Ts06] oder eine logarithmische Skala zwischen -100 dBm und -40 dBm [Ro05] oder bspw. -100 dBm bis -60 dBm [Sa10] bei Mobilfunktechnologien wie UMTS verwendet. Diese Werte sind allerdings mit Vorsicht zu interpretieren, da neben den physikalischen Effekten auch die Charakteristiken der Geräte Einfluss haben. Des Weiteren ist die Menge an Paketverlusten eine mögliche Größe zur Abschätzung der Verbindungsqualität [Ts05]. Hier ist aber auch nur eine Abschätzung der Verbindungsqualität bei bereits schwachen Verbindungen möglich.

Der letzte Aspekt, der für die folgenden Algorithmen erforderlich ist, ist die Messung des Bedarfs der Endgeräte nach Datenübertragungen, um ein Verständnis für die Auslastung der Netze zu entwickeln und auf Engpässe und freie Kapazitäten der Infrastruktur zu reagieren. Eine einfache Kennzahl ist die Anzahl der verbundenen *Mobile Stations* pro *Access Point* [Ma10, Ja07, Ja09]. Hierbei werden allerdings die Charakteristiken der einzelnen Stationen außer Betracht gelassen. So können Access Points mit wenigen bandbreitenintensiven Clients überlastet sein und Access Points mit vielen Geräten, die keine große Bandbreite anfordern, noch Kapazität für weitere Geräte haben. Eine weitere Idee ist das Zählen von TCP-Verbindungen [Ma10]. Diese Strategie hat allerdings auch Nachteile, wenn eine Menge von Clients mit unterschiedlichen Lastprofilen beobachtet werden sollen. Jardosh u. a. [Ja05] definieren *throughput* und

goodput. *Throughput* ist die Summe aller Bytes aus allen Frames über eine definierte Zeit. *Goodput* ist die Summe aus allen Bytes aus allen Control-Frames und allen bestätigten Daten-Frames. Eine weitere Metrik, eingeführt in [Ja09], ist die *Channel Utilization*. Sie beschreibt den Prozentsatz der Zeit, in der ein drahtloser Übertragungskanal durch Übermittlungen belegt ist. Hat ein Access Point zwei Kanäle, z. B. im 2,4 GHz- und 5 GHz-Band, ergeben sich unterschiedliche *Channel Utilization*-Werte für beide Kanäle. Überlagern sich Kanäle mit denen anderer Access Points, erhöht sich sehr wahrscheinlich die Kennzahl durch gegenseitige Beeinflussung. Jardosh u. a. [Ja05] weisen darauf hin, dass es einen Zusammenhang zwischen dem Verfahren zur Kollisionsvermeidung (CSMA/CA) in drahtlosen Netzwerken nach 802.11-Standard, der *Channel Utilization*, *throughput* und *goodput* gibt. Bis zu einer Auslastung von 80 % erhöhen sich *throughput* und *goodput*. Eine weitere Erhöhung führt zu einer Vielzahl von Fehlern in den Frames und zu Sendewiederholungen, die die Clients dazu bringen, ihre Datenrate zu drosseln. Durch diese Drosselung sinken *throughput* und *goodput*.

3 Analyse der WLAN-Infrastruktur der Universität Paderborn

Um Einsparungspotentiale für den Stromverbrauch von WLAN-Infrastrukturen zu identifizieren, wurde zunächst exemplarisch eine Analyse der vorhandenen Infrastruktur der Universität Paderborn und ihrer Nutzung durchgeführt. Für diese wurden sowohl das Benutzeraufkommen zu verschiedenen Zeiten als auch die vorhandenen Access Points und ihre räumliche Verteilung betrachtet. Die hier beschriebenen Erkenntnisse sind in analoger Form auch auf andere Infrastrukturen übertragbar.

3.1 Benutzeraufkommen

Das Benutzeraufkommen innerhalb einer Infrastruktur ist ein essentieller Aspekt für Versuche, die Energieeffizienz zu erhöhen. Wenn die Sparmaßnahmen die Dienstgüte nicht negativ beeinflussen dürfen, sollten diese nur dann eingesetzt werden, wenn die aktuell verfügbaren Ressourcen von den Benutzern nicht ausgeschöpft werden. Zentrale Systeme wie etwa das in Paderborn verwendete *Aruba AirWave* können einen Überblick über Benutzerzahlen zu verschiedenen Zeitpunkten geben. Abbildung 1 zeigt einen typischen Verlauf der Benutzerzahlen im WLAN der Universität Paderborn über den Zeitraum von einer Woche. Gravierende Unterschiede zwischen Wochentagen und dem Wochenende sowie vom späten Abend bis zu den frühen Morgenstunden sind Indikatoren für mögliche Optimierungsspielräume.

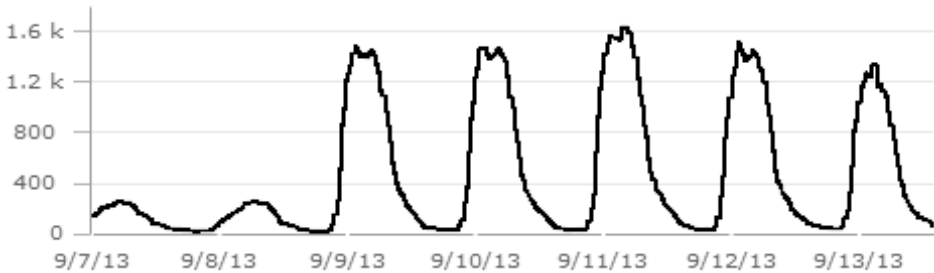


Abbildung 1:Benutzerzahlen wöchentlich (Sa-Fr)

Der gezeigte Verlauf entspricht den Erwartungen für ein universitäres Umfeld. Hierbei sind insbesondere die täglichen Vorlesungszeiten ausschlaggebend. Im Jahresverlauf lassen sich darüber hinaus Unterschiede zwischen normalem Universitätsbetrieb und vorlesungsfreien Zeiten deutlich erkennen. Würde man während der Zeit ohne nennenswerte Nutzung zwischen 23 Uhr und 7 Uhr alle Access Points komplett abschalten, wäre eine Energieeinsparung von 25% realisierbar. Allerdings stände der Dienst dann in dieser Zeit auch nicht zur Verfügung.

3.2 Bestandsaufnahme Access Points

Für die Bestandsaufnahme der verwendeten Geräte wurden erneut Daten aus dem *Aruba AirWave*-System verwendet. Insgesamt befanden sich zum Zeitpunkt dieser Arbeit an der Universität Paderborn 393 *Cisco* Access Points diverser Modelle in Betrieb. Die verwendeten Geräte besitzen jeweils zwei Funkmodule und sind so konfiguriert, dass diese jeweils sowohl über das 2.4 GHz- als auch das 5 GHz-Spektrum drahtloses Netzwerk zur Verfügung stellen.

Da die Angaben des Herstellers bezüglich des Stromverbrauchs im Betrieb unter *Power-over-Ethernet* lediglich den Maximalverbrauch enthielten, wurden eigene praktische Messungen durchgeführt, um den *idle*-Verbrauch der Access Points festzustellen. Messungen im Produktiveinsatz von APs konnten keinen wesentlichen Unterschied im Stromverbrauch in Abhängigkeit von aktiven Nutzern oder großer Auslastung feststellen. Der Stromverbrauch aller Access Points an der Universität Paderborn beträgt somit täglich 91.5 kWh.

In der Literatur [Ja07] wurden bei APs an Idle-Zeit Prozentzahlen von 20 bis 60 % zu unterschiedlichen Zeiten und Tagen festgestellt. Die Bestandsaufnahme an der Universität Paderborn hat ergeben, dass durchschnittlich 65 % der vorhandenen APs sich nicht in Nutzung befinden.

3.3 Nachbarschaftsbeziehungen

Die räumliche Nähe benachbarter Access Points ist ausschlaggebend für Optimierungsmethoden, welche eine Verringerung der Dienstgüte vermeiden sollen. Die

Distanz zwischen zwei Access Points, unter Beachtung von physikalischen Hindernissen wie z. B. Wänden, ist entscheidend dafür, ob einer dieser Access Points ohne Verlust von Netzabdeckung und ohne zu starke Verringerung der Signalqualität abgeschaltet werden kann. Da ein manuelles Evaluieren hierbei praktisch kaum durchführbar ist, sollten hierfür automatisiert auswertbare Daten verwendet werden.

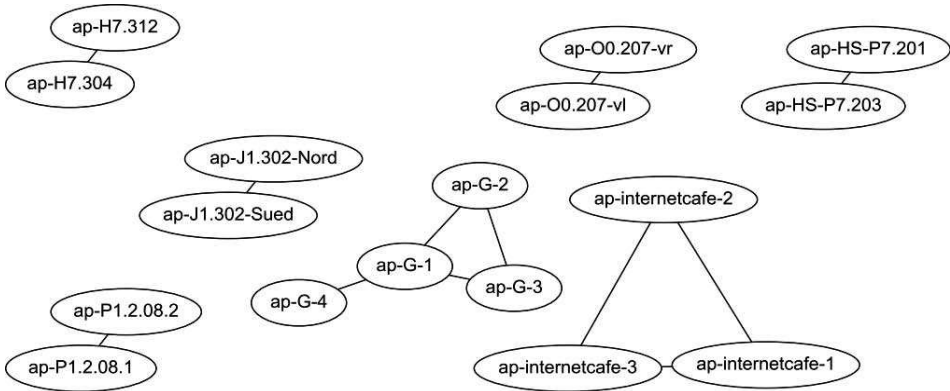


Abbildung 2: Nachbarschaftsbeziehungen (-55 dBm)

Eine Möglichkeit hierfür bieten die RSSI-Signalempfangswerte der Access Points untereinander. In diesem Artikel werden zwei Access Points als Nachbarn angesehen, wenn die Signalempfangswerte beider Funkmodule in beiden Richtungen über einem definierten Schwellenwert liegen. Abbildung 2 zeigt exemplarisch einen Auszug der Nachbarschaftsbeziehungen, die für einen RSSI-Wert von -55 dBm berechnet wurden. Insgesamt ist zu beobachten, dass der Nachbarschafts-Schwellenwert großen Einfluss auf die Anzahl der berechneten Nachbarschaftsbeziehungen hat und demnach ein wichtiger Parameter für etwaige Optimierungsverfahren ist, der sowohl Einfluss auf Einsparungen als auch auf die Dienstgüte hat.

4 Optimierungsverfahren

Im Folgenden werden verschiedene Resource-on-Demand-Strategien beschrieben, welche durch gezieltes Abschalten von Access Points Energieeinsparungen erzielen, ohne dabei die Dienstgüte negativ zu beeinflussen.

4.1 Green-Clustering

Green-Clustering ist ein von Jardosh u. a. [Ja07] bzw. [Ja09] entwickelter Resource-on-Demand-Algorithmus, welcher benachbarte Access Points zu Clustern zusammenfasst, in denen bedarfsabhängig Access Points an- oder abgeschaltet werden. Als Grundidee dient dabei die Annahme, dass in einem Cluster von benachbarten Access Points bei geringem Bedarf einer von diesen ausreicht, um die gewünschte Netzabdeckung zu gewährleisten. Abbildung 3 zeigt schematisch, wie ein solcher Cluster aus drei

benachbarten Access Points aussehen könnte. Da durch das Abschalten der Nachbarn die Abdeckungsfläche möglicherweise reduziert wird, muss eventuell die Sendeleistung des Cluster-Zentrums erhöht werden, um eine äquivalente Abdeckung zu gewährleisten.

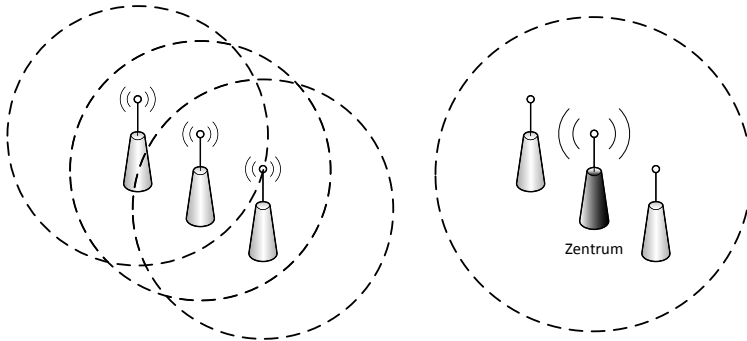


Abbildung 3: Beispielcluster

Abbildung 4 zeigt den Ablauf der Cluster-Bildung nach Jardos [Ja09]. Für die Erstellung der Cluster muss zunächst die sog. *Neighborhood Discovery* durchgeführt werden, bei der alle Nachbarschaftsbeziehungen berechnet werden (siehe [Ja09]). Auf dieser Basis werden anschließend durch einen *Greedy-Algorithmus* Cluster erstellt, wobei die Access Points zunächst nach der Anzahl ihrer Nachbarn sortiert werden und dann für jeden neuen Cluster stets jener Access Point als Cluster-Zentrum ausgewählt wird, welcher die größte Anzahl an Nachbarn besitzt. Anschließend wird der Reihe nach für jeden Nachbarn des Zentrums geprüft, ob dieser auch Nachbar von allen bereits im Cluster befindlichen Access Points ist. Nur wenn dies der Fall ist, wird der betreffende Access Point dem Cluster hinzugefügt. Ist ein Cluster komplett, werden die betreffenden Access Points nicht länger als Nachbarn anderer Access Points angesehen. Anschließend werden die verbleibenden Access Points erneut nach der Anzahl ihrer Nachbarn sortiert und ein weiterer Cluster erstellt. Der Algorithmus terminiert, wenn keine weiteren Access Points ohne Cluster verbleiben, welche noch Nachbarn besitzen.

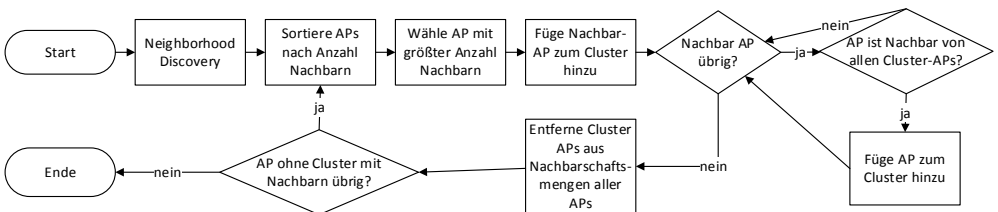


Abbildung 4: Green-Cluster *Greedy-Algorithmus*

Im Anschluss an das Clustering können die Cluster im laufenden Betrieb verwendet werden, um die Infrastruktur dynamisch an den Bedarf anzupassen. Dabei bleiben Cluster-Zentren und Access Points, welche keinem Cluster zugeordnet werden konnten, stets angeschaltet. Innerhalb der Cluster verwenden Jardosh u. a. [Ja09] die gemessene *Channel-Utilization* als Metrik zur Bedarfsermittlung. Überschreitet dieser Wert für einen Access Point innerhalb eines Clusters einen vorgegebenen Schwellenwert, wird, sofern möglich, ein Cluster-Nachbar hinzugeschaltet. Falls ein zugeschalteter Cluster-AP

für eine bestimmte Zeit keine verbundenen Benutzer hat, wird dieser abgeschaltet. Um die Last innerhalb eines Clusters zu verteilen, werden die verbundenen Benutzer außerdem durch ein aktives *Load Balancing* auf die Cluster-APs verteilt.

Der *Greedy*-Algorithmus von Jardosh u. a. wurde für die Infrastruktur der Universität Paderborn mit einigen kleinen Änderungen implementiert und evaluiert. Die Ergebnisse der Implementierung waren positiv, zeigten jedoch auch Verbesserungspotential für die Cluster-Bildung auf. Der nächste Abschnitt beschreibt, wie das Verfahren unter Verwendung eines mathematischen Optimierungsmodells verbessert wurde.

4.2 IP-Green-Clustering

Da der *Greedy*-Algorithmus nachweislich (siehe [Bo13]) nicht-optimale Cluster liefern kann, wurde ein ganzzahliges mathematisches Optimierungsmodell zur Cluster-Bildung formuliert und unter Benutzung der *Java*-Schnittstelle des *GLPK*-Solvers implementiert. Die Modellformulierung sieht wie folgt aus:

Mengen und Parameter:

A Menge der Access Points

$n_{ij} \in 0, 1$ Parameter, der angibt, ob $i, j \in A$ Nachbarn sind

Entscheidungsvariablen:

y_{ij} Binär-ganzzahlige Variable, die angibt, ob $i, j \in A \wedge i \neq j$ demselben Cluster angehören

Zielfunktion: $\max z = \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} y_{ij}$

Restriktionen:

- 1) $y_{ij} \leq n_{ij} \forall i, j \in A \wedge i \neq j$
- 2) $y_{ij} - y_{ji} \leq 0 \forall i, j \in A \wedge i \neq j$
- 3) $y_{ij} - y_{jk} \leq 1 \forall i, j, k \in A : n_{ik} = 0 \wedge i \neq j \neq k$
- 4) $y_{ij} + y_{ik} - y_{jk} \leq 1 \forall i, j, k \in A : n_{ik} = 1 \wedge i \neq j \neq k$
- 5) $y_{ij} \in \{0, 1\} \forall i, j \in A, i \neq j$

Für jedes mögliche Paar von Access Points existiert eine Entscheidungsvariable, welche angibt, ob die beiden APs demselben Cluster angehören oder nicht. Durch das Maximieren dieser Variable in der Zielfunktion wird die Anzahl der „aktivierten“ Cluster-Verbindungen maximiert. Die Restriktionen 2), 3) und 4) stellen hierbei sicher, dass jeder Access Point maximal einem Cluster angehören kann und innerhalb der Cluster alle APs Nachbarn sind.

Für die betrachteten Instanzen liefert das Modell innerhalb einer Laufzeit von wenigen Sekunden optimale Lösungen bezüglich der für die Grundabdeckung benötigten APs. Theoretisch existieren jedoch auch Fälle, für welche das Modell nicht-optimale Lösungen liefert. Dieses Problem könnte durch eine komplexere Modellformulierung gelöst werden, welche jedoch wahrscheinlich zu längeren Laufzeiten führen würde. Die Implementierung liefert i. d. R. leicht verbesserte Ergebnisse im Vergleich zum ursprünglichen Green-Clustering. Der nachfolgende Abschnitt beschreibt ein Verfahren, welches weitere Einsparungen ermöglicht.

4.3 Green-Star-Clustering

Das Ergebnis der bereits beschriebenen Verfahren ist, dass innerhalb einer Infrastruktur jeder Access Point entweder angeschaltet ist oder einen Nachbarn hat, der aktuell dessen Abdeckungsbereich übernimmt. Konstellationen wie in Abbildung 5 ermöglichen dem Green-Clustering kaum Einsparungen, obwohl es offensichtlich möglich ist, durch jeweils nur einen angeschalteten AP die nötige Grundabdeckung zu erzielen. Wie in der Abbildung zu sehen ist, würde es genügen, die beiden zentral gelegenen APs anzuschalten, um die sternförmig darum angeordneten Nachbarn mitzuversorgen.

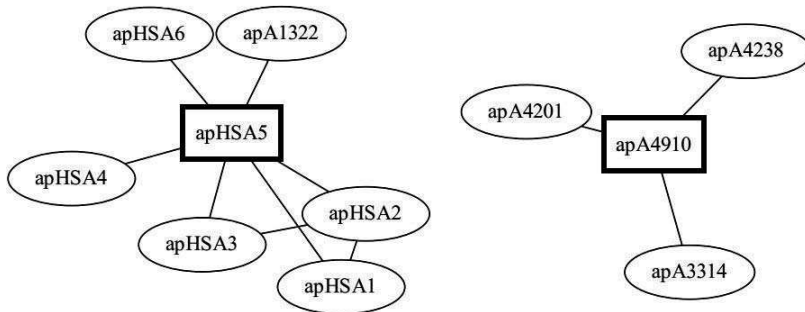


Abbildung 5: Green-Star-Clustering

Das komplett neu entwickelte Green-Star-Clustering ermöglicht es, die Anzahl der benötigten Access Points weiter zu reduzieren. Auch dieses Verfahren wurde unter Verwendung eines ganzzahligen Optimierungsmodells implementiert.

Das Modell minimiert die Anzahl der permanent angeschalteten APs. Gleichzeitig sorgt Restriktion 1) dafür, dass jeder Access Point entweder selber angeschaltet ist oder einen angeschalteten Nachbarn hat.

Mengen und Parameter:

A Menge der Access Points

N_i Menge der benachbarten APs $j \in A$ des APs $i \in A$

Entscheidungsvariablen:

y_i Binär-ganzzahlige Variable, die angibt, ob $i \in A$ permanent angeschaltet ist oder nicht

Zielfunktion: $\min z = \sum_{i \in A} y_i$

Restriktionen:

- 1) $y_i + \sum_{j \in N_i} y_j \geq 1 \forall i \in A$
- 2) $y_i \in \{0,1\} \forall i \in A$

Verglichen mit Green-Clustering und IP-Green-Clustering liefert dieses Modell stark verbesserte Ergebnisse für die minimal benötigten permanent angeschalteten APs. Allerdings fehlen bei diesem Verfahren „echte“ Cluster, in denen jeder AP die Aufgaben der anderen übernehmen kann. Im laufenden Betrieb führt dies zu einer erhöhten Komplexität, da bei einer Bedarfssteigerung anstatt nur eines APs eventuell mehrere hinzugeschaltet werden müssen. Da die evaluierten Access Points mit 2-3 Minuten zum Hochfahren auch verhältnismäßig lange brauchen und Antennen nicht einzeln abgeschaltet werden können, kann es daher zum Verlust der Dienstgüte kommen.

Die einzelnen Algorithmen und die Messung der Dienstgüte werden im Detail in [Bo13] beschrieben.

5 Implementierung

Die oben beschriebenen Algorithmen wurden in Java implementiert und mit realen Daten der Infrastruktur der Universität Paderborn getestet. Hierfür wurden zunächst per *SNMP*-Schnittstelle aktuelle AP-Statusinformationen von den WLAN-Controllern extrahiert. Auf Basis dieser Daten wurden danach Cluster berechnet. Anhand von Signaldaten wurde anschließend analysiert, wie sich das Abschalten von Access Points auf die Signalqualität der Client-Geräte auswirken würde. Das An- bzw. Abschalten von Access Points wurde über einen Web-Service realisiert, welcher es ermöglicht, Ethernet Ports an den jeweiligen Switches einzeln zu schalten.

6 Zusammenfassung

In der Praxis empfiehlt es sich nach Analyse der Ergebnisse, den Green-Star-Clustering verstärkt zu Zeiten einzusetzen, wo typischerweise wenig Benutzer- bzw. Bedarfsfluktuation herrscht. Auf Basis einer detaillierten Analyse der Nutzungsaufkommen zu verschiedenen Tageszeiten sollte die WLAN-Infrastruktur an der Universität Paderborn demnach tagsüber von 7 bis 21 Uhr per IP-Green-Clustering und über Nacht von 21 bis 7 Uhr des nächsten Tages vom Green-Star-Clustering verwaltet werden. Damit ergibt sich eine Energieeinsparung von 15 % bei gleichbleibender Dienstgüte im Vergleich zu einer Einsparung von 25 % bei einer Komplettabschaltung zwischen 23 und 7 Uhr.

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des GreenPAD-Projekts (gefördert vom BMWi im Rahmen der IT2Green-Ausschreibung) erzielt.

Literaturverzeichnis

- [Bo13] Boehner, M.: Optimization the Energy-Consumption of WLAN-Infrastructures, Master thesis, Universität Paderborn, 2013
- [Ie12] IEEE: IEEE Std 802.11 - 2012: Telecommunications and information exchange between systems - local and metropolitan area networks - specific requirements, 2012
- [Ja05] Jardosh et al.: Understanding congestion in IEEE 802.11b wireless networks. IMC '05 Proceedings of the 5th ACM SIGCOMM conference on Internet Measurement, 2005
- [Ja07] Jardosh et al.: Towards an Energy-Star WLAN Infrastructure. Mobile Computing Systems and Applications, 2007
- [Ja09] Jardosh et al.: Green WLANs: On-Demand WLAN Infrastructures. Mobile Networks and Applications, 2009
- [Ku08] Kumar, et al.: Wireless networking. Morgan Kaufmann/Elsevier, 2008
- [La12] Lanzisera, S.; Nordman, B.; Brown, R.E.: Data network equipment energy use and savings potential in buildings. *Energy Efficiency*, 5(2), 2012, S. 149-162
- [Ma10] Marsan et al.: A simple analytical model for the energy-efficient activation of access points in dense WLANs. Proceedings of the 1st International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking, 2010
- [Re06] Rech, Jörg: Wireless LANs: 802.11-WLAN-Technologie und praktische Umsetzung im Detail; 802.11a/h, 802.11b, 802.11g, 802.11i, 802.11n, 802.11d, 802.11e, 802.11f, 802.11s. Heise, 2006
- [Ro05] Rodrig et al.: Measurement-based characterization of 802.11 in a hotspot setting. Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Experimental approaches to wireless network design and analysis, 2005
- [Sa10] Sauter, M.: From GSM to LTE: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband. Wiley, 2010
- [Sc05] Schwartz, Mischa: Mobile wireless communications. Cambridge University Press, 2005
- [Ts05] Tsukamoto et al.: Impact of layer 2 behavior on TCP performance in WLAN. IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE, 2005
- [Ts06] Tsukamoto et al.: Experimental Evaluation of Decision Criteria for WLAN Handover: Signal Strength and Frame Retransmission. Ubiquitous Computing Systems Journal, 2006