

Verteilte Messung und Vorhersage von Kanalauslastung in IEEE 802.11 Wireless LAN

Till Wollenberg¹

Abstract: Aufgrund der hohen Verbreitung und intensiven Nutzung von WLAN kommt es insbesondere in Bereichen mit hoher Gerätedichte (wie z. B. universitären Lehrgebäuden) schon heute zu Kapazitätsengpässen, die durch ausgelastete Funkkanäle verursacht werden. Eine Vorhersage der Funkkanalauslastung kann die Probleme durch bessere Nutzung der vorhandenen Spektrumsressourcen und proaktive Anpassung genutzter Dienste abmildern. Hierfür müssen Verfahren zur Messung der Kanalauslastung, Unterscheidung von Signalquellen, Vorhersage und Austausch von Messdaten kombiniert und weiterentwickelt werden. Der vorliegende Artikel stellt ein Konzept hierzu vor.

1 Einleitung

Drahtlose Netze nach dem Standard IEEE 802.11 Wireless LAN (WLAN) sind allgegenwärtig im Büro-, Privat- und Industrie-Umfeld. Die Anzahl WLAN-fähiger Geräte steigt weiterhin kontinuierlich, während gleichzeitig die je Gerät übertragenen Datenvolumina wachsen. Aufgrund des begrenzten, für WLAN nutzbaren Frequenzspektrums steigt hierdurch die Spektrumsnutzung sowohl in räumlicher wie auch zeitlicher Dimension.

Dieser Anstieg wird zusätzlich verstärkt durch andere Funkdienste, die im selben Frequenzbereich wie WLAN arbeiten, u. a. Bluetooth, IEEE-802.15.4-basierte Systeme (z. B. ZigBee), Audio/Video-Übertragungssysteme und schnurlose Telefone. Hierdurch erreicht WLAN an Orten mit einer hohen Zahl aktiver Geräte oder Geräten mit hoher Nutzungsdichte schon heute Kapazitätsgrenzen.

Die mit einer WLAN-Übertragung erzielbare Leistung wird einerseits durch die Auslastung des Funkkanals und andererseits durch die Signalqualität und Ausbreitungsbedingungen bestimmt. Auf den unteren Netzwerkschichten werden hierdurch die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Frame-Übertragung und die nutzbaren *Modulation and Coding Schemes* (MCS) limitiert. Auf Ebene der Vermittlungsschicht ergibt sich hieraus die Übertragungsqualität (messbar im Sinne von Datendurchsatz, Paketverlust, Latenz und Jitter), wodurch letztlich auf den oberen Netzwerkschichten Eigenschaften wie Sprach- oder Bildqualität, Download-Geschwindigkeit oder das Reaktionsverhalten interaktiver Anwendungen limitiert werden.

Um in Situationen mit hoher Kanalauslastung dennoch jedem Gerät einen fairen Anteil an Sendezeit einzuräumen und Kollisionen zu vermeiden, erscheint eine zentrale Koordination sinnvoll. Berücksichtigt man jedoch die große Menge inkompatibler Kommunikations-

¹ Universität Rostock, Fakultät für Informatik und Elektrotechnik, Institut für Informatik, Lehrstuhl für Informations- und Kommunikationsdienste, 18051 Rostock, till.wollenberg@uni-rostock.de

systeme, die verschiedenen administrativen Bereiche, zu denen WLANs gehören, und die Tatsache, dass es sich bei manchen Spektrumsnutzern überhaupt nicht um Kommunikationssysteme handelt, erscheint die Durchführbarkeit eines solchen Ansatzes fragwürdig.

Der im folgenden vorgestellte, dezentrale Ansatz zur Verringerung der Problemfolgen basiert stattdessen darauf, dass jedes WLAN-Gerät versucht, den negativen Einfluss von Emissionen Dritter auf die eigenen Übertragungen zu minimieren und/oder sich an die gegebenen Umstände bestmöglich anzupassen. Je nach Netzwerkschicht können verschiedene Parameter angepasst werden:

- Auf Ebene der *Bitübertragungsschicht* kann ein WLAN-Gerät auf einen Funkkanal wechseln, der in naher Zukunft eine geringere Auslastung und/oder geringeres Interferenzniveau erwarten lässt. Ferner kann es MCS wählen, die zu kürzeren Übertragungen führen, um die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen zu verringern sowie die genutzte Kanalbreite anpassen (z. B. keine Nutzung von 40-MHz-Kanälen). Bei erwartbarem anhaltend hohem Rauschpegel kann das Gerät zudem die für das Kanalfrei-Beurteilung genutzten Grenzwerte anheben.
- Auf Ebene der *Sicherungsschicht* von 802.11 können Parameter wie die Größe des Contention Window, Grenzwerte für die Frame-Fragmentierung und -Aggregation sowie die Strategie für Sendewiederholungen angepasst werden.
- Auf Ebene der *Darstellungsschicht* können Probleme, welche auf tiefer liegenden Schichten entstehen, in gewissen Grenzen ausgeglichen oder kaschiert werden, indem z. B. beim Media Streaming das verwendete Codec, die Quantisierung, Fehler-toleranz, Puffergrößen und/oder Paketierungsstrategie angepasst werden.
- Auf Ebene der *Anwendungsschicht* kann die Auswahl der Dienste und Anwendungen auf solche beschränkt werden, die unter den gegebenen bzw. erwartbaren Netzwerkbedingungen sinnvoll nutzbar sind. Zudem können nicht-interaktive bzw. Stapeldienste wie z. B. automatische Softwareupdates gezielt in Zeitbereiche mit erwartbar niedriger Kanalauslastung verschoben werden.

Obwohl o. g. Anpassungen grundsätzlich immer reaktiv erfolgen können, ist im Sinne der Nutzererfahrung eine proaktive Anpassung wünschenswert. So sollte bei erwartbar stark ausgelastetem Funkkanal für eine Videoübertragung von vornherein eine Kodierung mit niedriger Bitrate ausgewählt werden statt z. B. erst nach Unterbrechungen von einer hochbitratigen auf eine niederbitratige Kodierung zu wechseln.

Für eine **proaktive Anpassung** benötigen die beteiligten WLAN-Geräte neben Informationen über die aktuellen Signalbedingungen vor allem eine Vorausschau auf die zu erwartende Kanalauslastung. Diese sollte im Idealfall für alle verfügbaren WLAN-Funkkanäle vorliegen und die je nach Anwendung nutzbringenden Zeitspannen abdecken.

Um die zukünftige Kanalauslastung abzuschätzen, muss die Auslastung gemessen und im Zeitverlauf erfasst werden. Aufgrund des unterschiedlichen Einflusses auf WLAN-Übertragungen müssen hierbei verschiedene Quellen der Auslastung erkannt und unterschieden werden. In Abschnitt 2 wird ein Ansatz hierzu vorgestellt.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen fokussieren auf das u. a. für WLAN genutzte **2,4-GHz-ISM-Band**, da in diesem die Kanalauslastung aufgrund der hohen Verbreitung entsprechender WLAN-Geräte besonders problematisch ist. Die Mehrheit der in diesem Band verwendeten Funkssysteme werden entweder direkt von Menschen bedient oder stehen in Zusammenhang mit menschlichen Aktivitäten. Da diese Aktivitäten typischerweise Regeln folgen (z. B. Tageszeit, Wochentag etc.) sind Muster in der Kanalauslastung zu erwarten, die sich für eine Vorhersage nutzen lassen. In Abschnitt 3 wird hierauf eingegangen.

Da die Kanalauslastung aufgrund der typischerweise geringen Reichweite von WLAN ein lokales Phänomen ist, müssen Messdaten für eine nutzbringende Vorhersage möglichst feingranular erhoben werden. In Abschnitt 4 wird ein Weg vorgestellt, um den Aufwand hierbei gering zu halten. Aus dem gewählten Weg der Teilung von Messergebnissen ergeben sich neue Herausforderungen im Bezug auf Datenschutz und Datensicherheit, welche ebendort umrissen werden, bevor in Abschnitt 5 ein Fazit gezogen wird.

2 Messung der Kanalauslastung

Historische Messdaten bilden die Grundlage für eine Vorhersage der Kanalauslastung. Daher muss die aktuelle Auslastung an jedem Ort, für den später eine Vorhersage erstellt werden soll, gemessen und im Zeitverlauf aufgezeichnet werden. Die Auslastung wird neben WLAN durch eine Vielzahl anderer Funkssysteme verursacht. Während das für WLAN verwendete Kanalzugriffsverfahren (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA) durch logische³ und physikalische Kanalfrei-Erkennung versucht, die Sendezeit zwischen sendewilligen Stationen fair aufzuteilen und Kollisionen (gleichzeitiges Senden mehrerer Stationen) zu vermeiden, gilt dies für andere Funkssysteme nicht zwangsläufig. Einfache Messansätze wie z. B. auch das in 802.11k eingeführte *Channel Load*-Element geben nur die gesamte (mittlere) Kanalauslastung über einen gewissen Zeitbereich an.

Um eine Messung der Kanalauslastung zu erhalten, die der Kanalfrei-Wahrnehmung einer WLAN-Station nahe kommt, müssen jedoch die jeweiligen Quellen unterschieden werden. Dies ist bei Einsatz von Labormessgeräten [WM10], Software Defined Radios (SDR) [De10] oder begrenzt mit speziellen Funktionen einiger WLAN-Chipsätze möglich [RPB12]. Um eine breite Basis an datenerfassenden Geräten zu erhalten, sind demgegenüber jedoch geringe Hardwareanforderungen an die messenden Geräte wünschenswert. Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit wurde daher ein Ansatz gewählt, der zwei Datenquellen verbindet und geringe Hardwareanforderungen stellt:

1. Unter Einsatz seiner **WLAN-Empfangshardware** erfasst jedes teilnehmende Gerät die durch *WLAN-Aussendungen* auf dem aktuell vom Gerät verwendeten WLAN-Kanal verursachte Kanalauslastung. Hierbei wird ausgenutzt, dass jede WLAN-Station zunächst jeden korrekt empfangenen 802.11-Frame dekodiert und erst danach ggf. verwirft, falls er nicht für sie relevant oder fehlerhaft ist. Daher liegen

³ Konzept des *Network Allocation Vector* (NAV), vgl. 802.11-2012 Kapitel 9.3

Informationen wie Zeitpunkt des Empfangs, Absender, Typ und Funktion des Frames sowie Kanal und Dauer der Aussendung grundsätzlich für jeden empfangbaren Frame vor bzw. können abgeleitet werden. Zusätzlich muss das Gerät die durch eigene Aussendungen verursachte Auslastung berücksichtigen.

2. Geräte, die die Möglichkeit dazu haben, erfassen zusätzlich den Signalpegel auf dem aktuellen und/oder weiteren Funkkanälen ähnlich einem **Spektrumanalysator**. Anhand des gemessenen Pegels kann dann entschieden werden, ob ein Nutzsignal (gleich welchen Ursprungs) oder Hintergrundrauschen vorliegt. Da hierbei keine hohe Genauigkeit erforderlich ist, können für diese Messung preisgünstige und energiesparende Ein-Chip-Lösungen für Schmalband-Anwendungen im 2,4-GHz-Band verwendet werden, die unabhängig vom WLAN-Interface betrieben werden.

Um die **durch WLAN verursachte Auslastung** zu ermitteln, wird getrennt nach Funkkanal für jeden Frame die Übertragungsdauer berechnet, wobei logische Größe, MCS, Guard-Interval, Präambeltyp und Frame-Aggregation berücksichtigt werden müssen. Aus der Summe der Übertragungsdauern im Verhältnis zur Anwesenheitszeit auf dem jeweiligen Funkkanal ergibt sich die durch WLAN-Übertragungen verursachte Kanalauslastung. Berücksichtigt werden müssen hierbei jedoch:

- Die Unterabtastung, welche bei WLAN-Clients durch Wechseln der Kanäle und durch zeitweises Abschalten der Empfangshardware (Energiesparfunktionen) entsteht. Sie betrifft vorwiegend Client-Geräte und muss in Form einer verringerten Gewissheit der Messergebnisse berücksichtigt werden.
- Interferenz von benachbarten Funkkanälen (Adjacent Channel Interference, ACI), welche im 2,4-GHz-Band aufgrund der überlappend definierten WLAN-Kanäle besonders relevant ist. Je nach Modulationsverfahren werden auf Nachbarkanälen ausgesandte Frames noch empfangen (bei DSSS, mit verringertem Signal-Rausch-Verhältnis) oder wirken wie eine Interferenz-Störung (bei OFDM).
- Frames, die aufgrund zu eines geringen Signalpegels oder einer Kollision nicht mehr empfangbar sind, werden in der Berechnung der durch WLAN verursachten Kanalauslastung nicht berücksichtigt.
- Dies gilt ebenso für Frames, deren Übertragungsverfahren vom messenden Gerät nicht unterstützt werden (MCS, Kanalbreite, Kodierung, Anzahl MIMO-Ströme).

Für die Ermittlung der **Gesamtkanalauslastung** mit Hilfe des Spektrumanalysators wird der verwendete Empfänger-IC auf eine geeignete Bandbreite konfiguriert (typisch zwischen 100 kHz und 500 kHz) und anschließend schrittweise so auf verschiedene Mittenfrequenzen abgestimmt, dass das gesamte Frequenzband abgedeckt wird. Zwischen den Neuabstimmungen wird jeweils der aktuelle Signalpegel ausgelesen. Im Versuch des Autors wurde hierfür ein CC2500 von Texas Instruments eingesetzt. Bei einer Bandbreite von 500 kHz wurden bei Abtastung des Bereiches 2.399–2.485 MHz ca. 3,7 Abtastungen je Sekunde erreicht, wobei der Signalpegel mit einer Auflösung von 1 dBm erfasst wurde.

Berücksichtigt werden müssen bei dieser Art der Erfassung:

- Der Zustand des Kanals (frei, belegt) muss anhand des gemessenen Signalpegels geschätzt werden. Hierzu muss ein geeignetes Modell eingesetzt werden, das (ggf. adaptiv) Hintergrundrauschen und Nutzsignale trennt.
- Die Quelle des Nutzsignals kann nicht bzw. nur in geringem Umfang detektiert werden. In [B112] wird ein Ansatz hierzu vorgestellt.
- Die Empfangswege (Antenne, Vorverstärker etc.) von WLAN-Modul und Zusatz-IC unterscheiden sich, was sich u. a. in abweichenden Signal- und Rauschpegeln niederschlagen kann.

Im Ergebnis liegen bei geringem zusätzlichem **Hardware-, Kosten- und Energieaufwand** Messwerte sowohl für die durch WLAN verursachte als auch die gesamte Kanalauslastung vor, wodurch sich die durch sonstige (nicht als WLAN erkennbare) Übertragungen verursachte Auslastung rechnerisch ermitteln lässt. Die Zeitauflösung der WLAN-Messung ist hierbei sehr hoch; die Zeitauflösung für die Gesamtauslastung vom verwendeten Empfangs-IC abhängig.

Problematisch ist die Erfassung von Funksystemen, die selbst adaptiv arbeiten, d. h. bei erkannten WLAN-Transmissionen selbst nicht senden (z. B. Bluetooth mit Adaptive Frequency Hopping, AFH). Bei einer Vorhersage der Kanalauslastung äußert sich dies in einer Überschätzung der durch Nicht-WLAN-Systeme verursachten Auslastung. Ferner stößt das Verfahren an Grenzen, wenn WLAN-Module zum Einsatz kommen, die das in 802.11 definierte Verfahren zur Beurteilung der Kanalfreiheit i. d. R. auf Kosten anderer WLAN-Stationen abändern, um z. B. trotz hohen Interferenzpegels senden zu können.⁴

Um eine Vorhersage für die zukünftige Kanalauslastung zu erstellen, sind möglichst lückenlose historische Messdaten nötig, die möglichst viele Orte und WLAN-Kanäle abdecken. Um trotz der begrenzten Messmöglichkeiten *eines* WLAN-Geräts eine gute Datenabdeckung zu erhalten, können die Messungen verschiedener Geräte, wie in Abschnitt 4 dargestellt, kombiniert werden.

3 Analyse und Vorhersage

Im Ergebnis der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Messung sowie nach Kombination mit Messdaten anderer Geräte wie in Abschnitt 4 beschrieben verfügt jedes am Verfahren teilnehmende WLAN-Gerät für seinen aktuellen Standort und jeden WLAN-Kanal über Informationen bzgl. der Kanalauslastung in der Vergangenheit in Form einer Zeitreihe, getrennt nach WLAN- und sonstiger Auslastung. Die Zeitreihe kann hierbei Lücken aufweisen und ist mit Unsicherheiten behaftet.

Es handelt sich typischerweise um eine **periodische Zeitreihe**, d. h. es treten sich wiederholende Muster auf und es gibt keinen globalen Trend. Für derartige Systeme bietet

⁴ vgl. US-Patent 7.522.669

sich eine Analyse der Reihe im Frequenzbereich an. Bei den vom Autor im Rahmen von Langzeitmessungen der WLAN-Kanalauslastung in universitären Lehrgebäuden erhobenen Messdaten (siehe Abschnitt 4) zeigen sich in der Praxis eine Vielzahl relevanter Spektralkomponenten vom sehr hochfrequenten Millisekundenbereich (Folge des typischen Burst-Charakters paketorientierter Datenübertragungen) bis hin zu sehr niederfrequenten Komponenten (Tagesrhythmen, Wochentag/-ende, Semesterferien). Es überlagern sich eine Vielzahl von Effekten, so dass bei einer Analyse der Zeitreihe der Gesamtkanalauslastung mittels klassischer Ansätze wie z. B. der ARMA-Modellierung ein größerer Anteil an nicht durch das Modell erklärter Auslastung verbleibt, was die Qualität einer darauf aufbauenden Vorhersage verschlechtert.

Dieses Problem kann durch eine **Dekomposition der Zeitreihe** deutlich verringert werden. Hierbei wird die Zeitreihe unter Verwendung der zur Verfügung stehenden Zusatzinformationen in einzelne Komponenten zerlegt, welche jeweils besser durch Modelle beschrieben werden können, wodurch letztlich die Vorhersagequalität steigt. Als Grundlage der Zerlegung bieten sich Informationen aus den WLAN-Übertragungen selbst an, da sämtliche Kontrollinformationen unabhängig vom Datenteil der 802.11-Frames grundsätzlich unverschlüsselt übertragen werden und somit für jede empfangende WLAN-Station auswertbar sind. Konkret wurde folgende Zerlegung vorgenommen:

1. Die von jedem Access-Point ausgesandten *Beacon-Frames* haben eine feste Periode und nahezu konstante Größe, so dass ihr Anteil an der zukünftigen Gesamtauslastung leicht geschätzt werden kann.
2. Sonstige *Management-* und *Control-Frames*. Diese korrelieren stark mit der Anzahl der anwesenden Geräte. Die Geräteanzahl selbst kann aus den Messdaten rekonstruiert werden und weist i. d. R. ausgeprägte Muster im Zeitbereich auf.
3. *Datenframes* und direkt damit verbundene Control-Frames bilden eine eigene Komponente. Diese kann weiter nach einzelnen WLAN-Stationen zerlegt werden, welche besonders ausgeprägte Muster oder ein homogenes Verhalten zeigen.
4. Da die entstehende Kanalauslastung bei konstantem Datenvolumen signifikant vom gewählten Übertragungsverfahren (MCS, Anzahl MIMO-Datenströme etc.) abhängt, kann eine *Bereinigung* hierzu zusätzlich die Zerlegung verbessern.

Es gibt Situationen, die nur selten oder unregelmäßig auftreten (Feiertage, Semesterferien), so dass sie nicht oder nur bei Vorliegen sehr weitreichender Daten erkannt werden können. Hier kann die Zuhilfenahme von **Kontextfaktoren** wie z. B. Kalenderinformationen, Raumbelegungsplänen oder Wissen über Ferienzeiträume die Vorhersage verbessern, indem die Vorhersage für verschiedene Situationen (diskrete Zustände) getrennt erfolgt. Neben dem Problem der Verfügbarkeit maschinell auswertbarer Kontextinformationen ergeben sich hierbei jedoch im Hinblick auf die im folgenden Abschnitt beschriebene Verteilung entsprechender Informationen zusätzliche Fragen zum Datenschutz.

Bei einer Vorhersage der Kanalauslastung auf Basis wesentlicher Spektralkomponenten bleibt jedoch immer die Möglichkeit von Situationen, die von den bisherigen Mustern abweichen. Daher ist eine **Fehlererkennung** nötig, die ggf. die Vorhersage aussetzt und

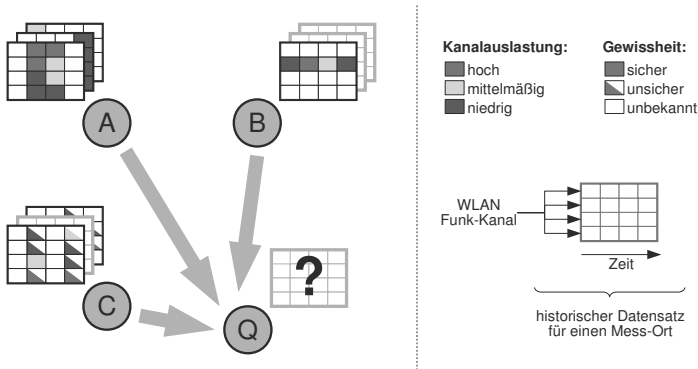


Abb. 1: Illustration zum Austausch historischer Messdaten zur Kanalauslastung zwischen WLAN-Geräten. Die Geräte A–C verfügen über lückenhafte Messdaten für verschiedene Mess-Orte. Die Daten unterscheiden sich in Zeitbereich, WLAN-Kanälen und der Gewissheit. Das neu hinzukommende Gerät Q verfügt nicht über eigene Messdaten. Es fragt daher die Daten von A–C ab und muss entscheiden, welche Daten genutzt und wie sie zu einem Gesamtbild kombiniert werden.

nötigenfalls historische Messdaten verwirft. Die Vorhersage kann zudem **Verdrängungseffekte**, die beim konkurrierenden Kanalzugriff verschiedener WLAN-Stationen und anderer (adaptiver) Spektrumsnutzer bei gesättigten Kanälen entstehen, nicht erfassen. Nutzt ein Großteil der anwesenden WLAN-Stationen eine Vorhersage auf ähnlicher Datengrundlage, können ebenfalls **Synchronisationseffekte** auftreten (mehrere Stationen beginnen simultan, einen als gering ausgelastet vorhergesagten Kanal zu nutzen), die durch Erweiterungen des Austausch- hin zu einem Koordinationsverfahren aufgefangen werden müssen.

4 Verteilte Messung und Datenaustausch

Mit dem in Abschnitt 2 beschriebenen Verfahren kann ein einzelnes WLAN-Gerät Messdaten zur Kanalauslastung erheben. Aufgrund der geringen typischen Reichweite von WLAN als Ergebnis geringer Sendeleistung und Dämpfung durch Wände etc. ist die Kanalauslastung jedoch nur am Messort bzw. in geringer Distanz zu diesem gültig. Um die zukünftige Auslastung an einem beliebigen Ort abzuschätzen, müssen daher Messdaten an möglichst vielen Ort aufgenommen werden. Da eine Installation dedizierter Mess-Systeme wie z. B. in [Zh13] vorgeschlagen mit hohen Kosten und/oder einer langsamen Verbreitung einhergeht, wird im folgenden ein alternativer Ansatz vorgeschlagen.

Hierbei nimmt jedes WLAN-Gerät, welches am Messverfahren teilnimmt, selbst Messdaten auf, soweit es seine Funktion nicht beeinträchtigt und mit Energiesparanforderungen vereinbar ist. Fest installierte Mess-Punkte können das System ergänzen. Die am Messverfahren teilnehmenden Geräte **tauschen dann untereinander ihre Messdaten aus**, so dass jedes Gerät seine Datensätze historischer Kanalauslastung vervollständigen kann. In Abbildung 1 wird das Konzept dargestellt: Hier erhält ein Gerät Q ohne historisches Wissen Informationen von drei verschiedenen Geräten, die jeweils Messdaten mit unterschiedlicher Zeit-, Kanal- und Ortsabdeckung sowie unterschiedlicher Gewissheit besitzen. A ist

mobil und kann auf allen WLAN-Kanäle Daten mit hoher Verlässlichkeit erfassen. *B* könnte z. B. ein Access-Point sein, der ortsfest ununterbrochen auf einem bestimmten WLAN-Kanal arbeitet; *C* ein mobiles Gerät mit begrenztem Energievorrat, das nur lückenhaft Daten erfassen konnte. *Q* muss diese Daten zu einem Gesamtbild kombinieren und über die Anwendbarkeit auf seinen aktuellen Aufenthaltsort entscheiden.

Hierbei müssen vier wesentliche Teilprobleme gelöst werden:

1. Jedes Gerät muss seinen **Aufenthaltsort** bestimmen können.
2. Die Ähnlichkeit zweier Messorte im Sinne der **Ähnlichkeit** der Messdaten zur Kanalauslastung muss ermittelbar sein.
3. Die Messdaten müssen in einem einheitlichen **Format** beschrieben sein.
4. Es muss ein **Verfahren zum Auffinden und Austauschen** von Messdatensätzen definiert sein.

Ferner ergeben sich im Bezug auf die praktische Umsetzbarkeit Forschungsfragen:

- Sind an einem Ort typischerweise ausreichend viele WLAN-Geräte präsent, um die Kanalauslastung lückenlos zu erfassen?
- Erlauben die Aktivitätsmuster der präsenten Geräte eine ausreichende Erfassung aller nutzbaren WLAN-Kanäle?
- Entsteht durch die Mobilität der Geräte ausreichend Austauschpotential für Messdaten?

Für die Orts- und Nähebestimmung bieten sich zunächst etablierte Positionsbestimmungssysteme wie z. B. GPS an. Neben dem Problem der schlechten Verfügbarkeit in Innenräumen ergibt sich primär das Problem, dass geographisch nahe Orte nicht zwangsläufig ähnliche Messergebnisse aufweisen. So werden zwei Messorte im Abstand von 2 m im freien Feld mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit eine nahezu identische Situation aufweisen, während die Kanalbelegung völlig unterschiedlich ausfallen kann, wenn zwischen beiden Punkten eine Metall- oder Stahlbetonwand abschirmend wirkt.

Ziel muss daher eine **Nähedefinition** sein, die auf Ähnlichkeit der Beobachtungen abzielt und idealerweise geringe Anforderungen an die messenden Geräte stellt. Aufgrund der Tatsache, dass alle teilnehmenden Geräte mindestens über eine WLAN-Schnittstelle verfügen, bieten sich Fingerprint-basierte Verfahren an. Hierbei wird ein Ort über die dort empfangbaren WLAN-Stationen identifiziert. Access-Points und Clients können dabei unterschiedlich gewichtet werden, da erstere zumeist ortsfest sind.

Zur Bewertung dieses Ansatzes wurden in einer im Rahmen des Dissertationsvorhabens des Autors in einem universitären Büro- und Lehrgebäude durchgeführten Studie in zehn benachbarten Räumen Messgeräte installiert, die Daten zur Kanalauslastung auf WLAN-⁵

⁵ erfasst wurden WLAN-Aussendungen nach den Standards 802.11b/g/n mit max. 2 MIMO-Datenströmen

und Spektrumsebene sowie die anwesenden WLAN-Geräte über drei Monate hinweg erfasst haben. Bewertet wurde u. a. die paarweise Ähnlichkeit der festgestellten Kanalbelegung in Abhängigkeit von euklidischer Distanz und Ähnlichkeit der Fingerprint-Mengen. Die in [WD13] ausführlich beschriebene Studie kommt zu dem Ergebnis, dass Fingerprint-basierte Nahdefinitionen grundsätzlich geeignet sind und bessere Ergebnisse im Bezug auf die Ähnlichkeit der Messdaten ergeben als der euklidische Abstand. Die Auswertung der Daten zu **anwesenden WLAN-Geräten** und deren Nutzungsverhalten aus der vorgenannten sowie einer weiteren, im selben Gebäude durchgeführten Studie ergab darüber hinaus eine hohe potentielle Mess-Abdeckung des Zeitbereichs sowie der WLAN-Kanäle.

Zum **Austausch von Messdaten** sind grundsätzlich verschiedene Ansätze mit individuellen Vor- und Nachteilen möglich:

- Ein Austausch *auf Ebene der 802.11-Sicherungsschicht*, d. h. zwischen WLAN-Stationen, die sich in Empfangsreichweite befinden. Da die austauschenden Geräte hierfür nicht zum selben (administrativen) Netz gehören müssen und insbesondere keine gemeinsame Konfiguration (Passwörter, Schlüssel, IP-Adressen) nötig ist, wird die Verbreitung der Messinformationen erleichtert.
- Ein Austausch *im lokalen Netz* auf Ebene der Netzwerk- oder Transportschicht. Dies schränkt den Austausch auf Geräte ein, die zum selben (administrativen) Netz gehören, bietet aber Vorteile im Bezug auf den Datenschutz (s. u.) und erlaubt überdies die Weiterleitung an Geräte, die sich nicht in unmittelbarer Nähe befinden, wodurch die Verbreitung der Messdaten innerhalb des Netzes beschleunigt werden kann.
- Ein *globaler Austausch* über das Internet, d. h. über einen oder mehrere zentrale Dienstanbieter⁶, die Server zum Sammeln der Messdaten bereitstellen. Dies erlaubt eine schnelle Verbreitung der Messdaten, bedingt jedoch einen Internetzugang für jedes nutzungswillige WLAN-Gerät und verstärkt durch die zentrale Sammlung von Daten die nachfolgend umrissenen Datenschutzprobleme.

Der Austausch von Messdaten wirft Fragen zu **Datenschutz und -sicherheit** auf: So können aus den Messdaten u. a. Rückschlüsse auf Nutzungsmuster gezogen, Anwesenheitsprofile von WLAN-Geräten erstellt und anhand der Ortsbeschreibungen der Datensätze in gewissem Umfang Bewegungsprofile der Gerätenutzer rekonstruiert werden. Vorgesetzte könnten z. B. die Anwesenheitszeiten ihrer Mitarbeiter anhand der Präsenz persönlicher WLAN-Geräte ermitteln oder Einbrecher „gute“ Zeitpunkte für Straftaten bestimmen. Ferner kann ein Angreifer durch gezielte Verbreitung falscher Auslastungsinformationen den Betrieb legitimer Geräte beeinträchtigen (Denial-of-Service-Angriff) und/oder sich selbst Vorteile verschaffen. Diesen Problemen kann einerseits durch Pseudonymisierung und Anonymisierung in den Messdaten (Schutz der Privatsphäre Dritter) sowie andererseits durch kryptographische Verfahren wie Signaturen und Web-of-Trust-basierte Vertrauensmodelle (Authentisierung von Messdaten als Schutz vor Manipulationen) begegnet werden.

⁶ ähnlich netzbasierter Ortsbestimmungsdienste wie *Google Location Services* und *Mozilla Location Service*

5 Zusammenfassung

Der Ansatz, mit WLAN-Geräten verteilt Messdaten zur Kanalauslastung zu erheben und untereinander auszutauschen, erscheint geeignet, um mittels Vorhersage vielfältige proaktive Optimierungen vornehmen, die schließlich zu einer besseren Spektrumsnutzung und Verbesserung der Nutzererfahrung führen. Zusätzlich können die erfassten Informationen im **Monitoring** von WLAN-Installationen eingesetzt werden, wobei mit dem vorgestellten Ansatz trotz geringem Hardware-Aufwand eine höhere Orts- und Kanalabdeckung erreicht werden kann als mit den integrierten Diagnosefunktionen marktüblicher Enterprise-WLAN-Systeme. Die vorgeschlagene kosten- und energiesparende umsetzbare Messmethode erlaubt die Trennung von WLAN- und Nicht-WLAN-bedingter Kanalauslastung und bildet die Grundlage für spektrale Vorhersagemodelle. Den durch den Austausch von Messdaten entstehenden Vorteilen stehen Fragen des Datenschutzes gegenüber, die vor dem Einsatz sorgfältig abgewogen werden müssen. Das vorgestellte Gesamtkonzept kann aktuell verwendete, reaktive Optimierungsstrategien auf Basis lokalen Wissens entscheidend verbessern, jedoch ohne Erweiterungen bei starker Verbreitung durch Rückkopplungs- und Synchronisationseffekte an Grenzen stoßen. Eine Weiterentwicklung des Verfahrens hin zu einem konkreten Protokollvorschlag und ggf. einer Standardisierung ist wünschenswert.

Literaturverzeichnis

- [Bl12] Bloessl, Bastian; Joerer, Stefan; Nordin, Noorsalwati; Sommer, Christoph; Dressler, Falco: SaFIC: A Spectrum Analysis Framework for Interferer Classification in the 2.4 GHz Band. In: 31st IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM 2012). IEEE, Orlando, USA, 2012.
- [De10] Denkovski, D.; Pavloski, M.; Atanasovski, V.; Gavrilovska, L.: Parameter settings for 2.4GHz ISM spectrum measurements. In: 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL). Nov 2010.
- [RPB12] Rayanchu, Shrvan; Patro, Ashish; Banerjee, Suman: Catching Whales and Minnows using WiFiNet: Deconstructing Non-WiFi Interference using WiFi Hardware. In: Proceedings of the 9th USENIX conference on Networked Systems Design and Implementation. USENIX Association, S. 57–70, 2012.
- [WD13] Wollenberg, Till; Dähn, Andreas: Empirical Study on Local Similarity of Spectrum Occupancy in the 2.4 GHz ISM Band. In (Jonsson, Magnus; Vinel, Alexey; Bellalta, Boris; Marina, Ninoslav; Dimitrova, Desislava; Fiems, Dieter, Hrsg.): Multiple Access Communications, Jgg. 8310 in Lecture Notes in Computer Science, S. 113–127. Springer International Publishing, 2013.
- [WM10] Wellens, Matthias; Mähönen, Petri: Lessons learned from an extensive spectrum occupancy measurement campaign and a stochastic duty cycle model. *Mobile networks and applications*, 15(3):461–474, 2010.
- [Zh13] Zhou, Ruogu; Xing, Guoliang; Xu, Xunteng; Wang, Jianping; Gu, Lin: WizNet: A ZigBee-based sensor system for distributed wireless LAN performance monitoring. In: Pervasive Computing and Communications (PerCom), 2013 IEEE International Conference on. IEEE, S. 123–131, 2013.