

Cross-Layer-Optimierungen für WLAN-Mesh-Netzwerke

Der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik der Universität Rostock
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

vorgelegte Dissertation von
Michael Rethfeldt
geb. am 14.06.1987 in Rostock

Rostock, 28. September 2020

Kurzreferat

Mesh-Netzwerke auf Basis der WLAN-Technologie (Wireless Local Area Network) bieten im Vergleich zu herkömmlichen, zentralisierten WLAN-Installationen eine erhöhte Flexibilität und Ausfallsicherheit. Durch die Fähigkeit der Spontanvernetzung und Datenweiterleitung über mehrere Zwischenstationen ermöglichen sie eine robuste und kostengünstige Abdeckung großer Areale, z.B. in Form von Zugangsnetzen, Backbones oder Service-Infrastruktur in Smart-City-Szenarien.

Der Trend hin zu proprietären, zueinander inkompatiblen Mesh-Lösungen behindert jedoch derzeit ihren praktischen Einsatz im großen Maßstab. Für den Langzeitbetrieb komplexer Mesh-Installationen ist eine flexible Austauschbarkeit von Geräten und somit die Überwindung der Herstellerbindung zwingend erforderlich. Eine logische Konsequenz ist die Etablierung von Standardtechnologien, die Kompatibilität bereits auf tiefster Ebene garantieren.

Die WLAN-Standarderweiterung IEEE 802.11s integriert erstmals Mesh-Funktionalität direkt in die WLAN-Sicherungsschicht (MAC Layer) und liefert damit eine vielversprechende Basis für interoperable Mesh-Lösungen. Oberhalb der standardisierten Grundfunktionen existieren jedoch zahlreiche Anforderungen und Problemstellungen im Hinblick auf die skalierbare Orchestrierung und Verwaltung des Netzwerks sowie die effiziente Nutzung der Kommunikationsressourcen durch übergeordnete Protokolle und Anwendungen, die durch IEEE 802.11s nicht behandelt werden.

Gegenstand dieser Arbeit ist es, das Verhalten von IEEE-802.11s-Mesh-Netzwerken in der Praxis zu untersuchen und Strategien und Lösungen zu entwickeln, durch die einerseits die Administrierbarkeit und Skalierbarkeit komplexer Mesh-Backbones erhöht werden und andererseits verteilte Anwendungen die darunter liegende Netzwerkstruktur gezielt berücksichtigen können, um das vorhandene Datendurchsatzpotential effizient zu nutzen. Übergeordnetes Ziel ist der Entwurf standardkonformer Lösungen, welche die durch IEEE 802.11s bereitgestellten Mechanismen integrieren und somit keine Abhängigkeiten von Spezial-Hardware oder proprietären Mesh-Protokollen aufweisen.

Dazu werden in dieser Forschungsarbeit zwei dezentrale Cross-Layer-Ansätze entwickelt, die Verbindungsinformationen der WLAN-Sicherungsschicht auch auf der Anwendungsschicht berücksichtigen. Dort werden diese genutzt, um Kommunikationsentscheidungen zu optimieren und die Netzwerkstruktur durch Partitionierung und Kanalselektion über vorhandene Konfigurationsschnittstellen geeignet anzupassen. Die Lösungen werden prototypisch implementiert und in einer realen Testumgebung untersucht, die im Rahmen der Arbeit entwickelt wurde. Diese erlaubt es durch einen Miniaturisierungsansatz, Mesh-Szenarien der Fläche von mehr als 300.000 m^2 auch im Labormaßstab abzubilden. Die Ergebnisse der Arbeit belegen die Praktikabilität und Wirksamkeit der Ansätze, welche eine nennenswerte Steigerung der Kommunikationseffizienz erzielen, ohne dabei Änderungen an den IEEE-802.11s-Standardmechanismen vorzunehmen.

Abstract

Mesh networks based on the WLAN (Wireless Local Area Network) technology offer an increased flexibility and reliability compared to conventional centralized WLAN installations. Due to the ability of spontaneous interconnection and data forwarding over multiple intermediate nodes they enable a robust and cost-effective coverage of large areas in the form of wireless access networks, backbones, or service infrastructure in smart city scenarios.

However, the trend towards proprietary and incompatible mesh solutions currently hinders their practical use on a large scale. For the long-term operation of complex mesh installations it is essential to overcome the vendor lock-in to allow for a flexible exchangeability of devices. A logical consequence is the establishment of standard technologies that guarantee compatibility at the lowest level.

The WLAN standard amendment IEEE 802.11s introduces mesh functionality to the WLAN MAC layer and provides a promising basis for interoperable mesh solutions. However, beyond the standardized functionality, there are numerous requirements and problems with regard to scalable network orchestration and administration as well as the efficient use of communication resources by overlying protocols and applications that are not covered by IEEE 802.11s.

The aim of this thesis is to investigate the practical behavior of IEEE 802.11s mesh networks and to develop strategies and solutions that, on the one hand, increase the scalability and manageability of complex mesh backbones and, on the other hand, enable distributed applications to explicitly consider the underlying network structure, allowing them to utilize the available network capacity efficiently. The overall goal is to design standard-compliant solutions that integrate the mechanisms provided by IEEE 802.11s and avoid any dependencies on specialized hardware or proprietary mesh protocols.

For this purpose, two decentralized cross-layer approaches are developed in this thesis, which consider MAC-layer connection information at the application layer. There they are used to optimize communication decisions and to adapt the network structure appropriately by means of partitioning and channel selection, using only available configuration interfaces. The solutions are implemented prototypically and investigated in a real testbed developed in the course of this work. Based on a miniaturization approach the testbed allows to reproduce mesh network scenarios of the area of more than $300,000\text{ m}^2$ also on a laboratory scale. The results prove the practicability and effectivity of the approaches, which notably increase communication performance without modifying the IEEE 802.11s standard mechanisms.