

Diss. ETH No. 22398

Scalable Web Technology for the Internet of Things

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Frank Matthias Kovatsch

Dipl.-Ing., Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
born on 2 September 1982
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Friedemann Mattern, examiner
Prof. Dr. Carsten Bormann, co-examiner
Prof. Dr. Thiemo Voigt, co-examiner

2015

Abstract

The [Internet of Things \(IoT\)](#) can be considered as a modern manifestation of Mark Weiser's classic vision of ubiquitous computing where tiny networked computers become part of everyday objects interweaving the virtual world and the physical world. The concept of the [IoT](#) originated some 15 years ago from linking real-world artifacts to virtual counterparts through [radio-frequency identification \(RFID\)](#) tags. More recently, environments have become 'smart' by augmenting physical objects with sensing or actuation capabilities and networking them with digital services. The ongoing standardization of Internet protocols for such [IoT](#) devices enables the seamless integration of smart things into the Internet. This trend is expected to eventually result in hundreds of billions of connected devices that need to be programmed, managed, and maintained. It has been shown that Web technology can significantly ease this process by providing well-known patterns and tools for developers and users. The existing solutions are, however, often too heavyweight for highly resource-constrained [IoT](#) devices. Indeed, most connected devices are expected to remain resource-constrained, as progress in technology witnessed by Moore's Law is primarily leveraged to minimize dimensions, power consumption, and unit costs.

This dissertation presents a comprehensive solution for the seamless integration of highly resource-constrained [IoT](#) systems into the World Wide Web. Our thesis is that *existing protocols and programming models do not effectually meet the needs of the IoT. We identify two key challenges for the vision to succeed: application-layer interoperability and improved usability for both developers and users. Both requirements can be met by an approach that amalgamates results from the field of Wireless Sensor Networks and the World Wide Web.* This leads to the research questions (i) how to scale Web technology down to resource-constrained devices, (ii) how to scale it up to hundreds of billions of devices, and (iii) how to use it to improve the usability of the tiny networked computers. Our work addresses the resulting challenges with the following contributions: Being actively involved in the design and standardization of the [Constrained Application Protocol \(CoAP\)](#) within the [Internet Engineering Task Force \(IETF\)](#), we (i) evaluate the new Web protocol

in the different components of **IoT** systems, namely resource-constrained devices, Cloud-based services, and user interaction. Based on this, we (ii) propose system architectures and guidelines for an optimal implementation and utilization of **CoAP**. Furthermore, we (iii) present concepts and tools for Web-like software development for the **IoT**. To support our thesis, we also (iv) provide working open source implementations of our concepts, which build the basis for several **IoT** projects in academia and industry.

More concretely, we show in this dissertation that the **CoAP** protocol suite closes the technological gap between low-power **IoT** devices and the well-known patterns of the Web. We first consider resource-constrained environments, where efficient Web technology can relieve application developers from the burdens of embedded programming while maintaining the performance of classic approaches. In addition to a proof of concept and system evaluation, we give guidelines that allow for significantly smaller memory footprints of **CoAP** implementations. Next, we show that the low overhead of the new protocol also improves performance in unconstrained environments, such as **IoT** cloud services that have to manage the myriad of **IoT** devices. We present a system architecture for scalable back-end services that outperforms classic high-performance **Hypertext Transfer Protocol (HTTP)** Web servers as well as other state-of-the-art **CoAP** implementations. Finally, our work evaluates usability aspects of the Web programming model for **IoT** applications. We show that Web mashups, that is, the linking of different services through lightweight scripting, are also directly applicable to our concepts for highly resource-constrained systems. Complementary, we study Web browser support for **CoAP** to fully close the gap between **IoT** devices and the Web. Based on these findings, we motivate the design decisions behind **CoAP**, in particular for our contributions, and explain how developers can improve their protocol implementations accordingly.

Along with this dissertation, we deliver open source implementations of our approach that go beyond prototypes. Our *Erbium (Er) REST Engine* is an optimized **CoAP** implementation for constrained environments. It provides application developers with resource handler abstractions like regular Web frameworks while maintaining a small memory footprint. Erbium became the default **CoAP** implementation for Contiki, a popular embedded operating system for the **IoT** that is used in many industry products. Our Java-based *Californium (Cf) CoAP framework* enables high-performance **CoAP** services. The project also contains a **DTLS** 1.2 implementation called *Scandium (Sc)* and the *Actinium (Ac)* application server, a RESTful runtime system for Web-like **IoT** mashups. Representing the state of the art for RESTful **IoT** services, the Californium project was adopted by the Eclipse Foundation within its **IoT** Industry Working Group.

Kurzfassung

Der Begriff *Internet der Dinge*, im Englischen **Internet of Things (IoT)**, beschreibt die Vision, die virtuelle mit der realen Welt eng zu verquicken. Hierbei handelt es sich um eine Konkretisierung des Ubiquitous Computings, welches von Mark Weiser zu Beginn der 1990er Jahre geprägt wurde. Die Idee zum **IoT** entstand vor etwa 15 Jahren, als die **RFID**-Technologie aufkam und dazu verwendet wurde, Alltagsgegenstände per Marker mit virtuellen Abbildern in IT-Systemen zu koppeln. Inzwischen ist es möglich, Dinge direkt mit computergestützter Intelligenz auszustatten, die zwar nur über begrenzte Ressourcen verfügt, aber dennoch in der Lage ist, drahtlos zu kommunizieren, physische Zustände zu messen und Aktoren zu steuern. Die aktuelle Standardisierung neuer Internetprotokolle erlaubt es überdies, derartige **IoT**-Geräte nahtlos mit dem Internet zu verbinden. Es wird erwartet, dass diese Entwicklung zur Vernetzung von Hunderten Milliarden Geräten führen wird, die allesamt programmiert, verwaltet und gewartet werden müssen. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass die Web-Technologie entscheidend zu diesem Prozess beitragen kann, da deren bewährte Muster und Werkzeuge die Arbeit für Entwickler und Benutzer vereinfachen. Die bisherigen Lösungen sind für die knappen Ressourcen gängiger **IoT**-Geräte jedoch meist zu schwergewichtig, zumal sich die Leistung vieler Geräte nicht wesentlich ändern dürfte. Der Grund hierfür ist, dass der stete Fortschritt im Sinne des mooreschen Gesetzes im Rahmen des **IoT** auch weiterhin hauptsächlich zur Minimierung des Formfaktors, des Energieverbrauchs und vor allem der Kosten genutzt werden dürfte.

Die vorliegende Dissertation liefert eine umfassende Lösung für das Problem, **IoT**-Geräte mit begrenzten Ressourcen nahtlos in das *World Wide Web* zu integrieren. Unsere These lautet, dass *vorhandene Protokolle und Programmiermodelle den Anforderungen des IoT nicht genügen, da für eine praktikable Umsetzung Interoperabilität und Software-Ergonomie im Vordergrund stehen müssen. Diese Anforderungen können jedoch erfüllt werden, indem man die Resultate aus den Forschungsbereichen der drahtlosen Sensornetze und des World Wide Webs geeignet kombiniert*. Daraus ergeben sich die folgenden Forschungsfragen: (i) Wie kann Web-Technologie auf ressourcenarme Geräte herunterskaliert werden? (ii) Wie kann sie auf Hunderte Milliarden Geräte hochskaliert werden? (iii) Wie kann man sie nutzen, um die Software-Ergonomie von vernetzten eingebetteten Systemen zu verbessern? Einen wichtigen Schritt stellt hierbei das neue

Constrained Application Protocol (CoAP) dar, an dessen Entwicklung wir im Rahmen dieser Arbeit aktiv beteiligt sind. **CoAP** wurde explizit für ressourcenarme Geräte und zugleich Maschine-zu-Maschine-Kommunikation innerhalb der **Internet Engineering Task Force (IETF)** standardisiert. Dabei leisten wir mit dieser Arbeit die folgenden Beiträge: Wir (i) evaluieren das neue Protokoll in den entsprechenden Systembereichen des **IoT**, nämlich ressourcenarme Geräte, cloud-basierte Dienste und Benutzerinteraktion. Dies ermöglicht uns den (ii) Entwurf von fundierten Systemarchitekturen sowie Richtlinien für **CoAP**. Des Weiteren entwickeln wir (iii) Konzepte und Hilfsmittel für einen Web-ähnlichen Softwareentwicklungsprozess im **IoT**. Wir untermauern unsere These mit (iv) funktionsfähigen Open-Source-Implementierungen unserer Konzepte, welche bereits von einigen **IoT**-Projekten in Wissenschaft und Industrie verwendet werden.

In der vorliegenden Dissertation weisen wir im Detail nach, wie **CoAP** und seine Erweiterungen die technische Lücke zwischen **IoT**-Geräten mit knappen Ressourcen und bewährter Web-Technologie schliesst. Zunächst zeigen wir, wie effizient umgesetzte Muster aus der Web-Welt die Entwicklung von vernetzten eingebetteten Systemen ohne Leistungseinbussen vereinfachen kann. Wir evaluieren unser Konzept anhand eines Prototypen, dessen weitere Optimierung zu einer stabilen Implementierung und einem Leitfaden zur Speicheroptimierung geführt hat. Im Anschluss zeigen wir, dass der geringe Overhead von **CoAP** auch im Bereich der Cloud-basierten **IoT**-Dienste von Vorteil ist, da er es ermöglicht, die grosse Zahl an erwarteten Geräten zu bewältigen. Hierzu präsentieren wir eine performante und skalierbare Systemarchitektur für das **IoT**-Service-Backend, welche sowohl aktuelle Hochleistungs-**HTTP**-Server als auch andere **CoAP**-Lösungen leistungsmässig übertrifft. Schliesslich betrachten wir die Benutzerfreundlichkeit für **IoT**-Entwickler, die sich aus unserer Web-basierten Lösung ergibt. Wir zeigen, dass Web-Mashups zur Verknüpfung mehrerer Dienste durch einfaches Scripting direkt auf unsere Konzepte für ressourcenarme **IoT**-Geräte anwendbar sind. Ergänzend analysieren wir die Vorteile durch die Unterstützung von **CoAP** im Web-Browser. Anhand dieser Erkenntnisse motivieren wir auch die Entwurfsentscheidungen, die bezüglich **CoAP** getroffen wurden, und verdeutlichen, wie Entwickler die Protokollspezifikation am besten umsetzen können.

Im Rahmen dieser Dissertation stellen wir auch umfangreiche Open-Source-Implementierungen zur Verfügung: Unsere *Erbium (Er) REST Engine* ist eine **CoAP**-Implementierung für eingebettete Systeme mit geringen Ressourcen, welche Aspekte der Software-Ergonomie berücksichtigt. Erbium ist Teil von Contiki, einem weit verbreitetem Betriebssystem für **IoT**-Geräte, das auch in Industrieprodukten verwendet wird. Das Java-basierte *Californium (Cf) CoAP Framework* ist für skalierbare Dienste in der Cloud gedacht. Dieses Eclipse-Projekt umfasst eine umfangreiche und leistungsstarke **CoAP**-Implementierung, Sicherheit durch die *Scandium (Sc) DTLS-1.2*-Implementierung und unsere *Actinium (Ac)* Laufzeitumgebung für **IoT**-Mashups.