

DISS. ETH NO. 26910

**Towards the Economy of Things:
Insights from the Convergence of Blockchain
Technology and the Internet of Things**

A dissertation submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Mathieu Chanson

MSc. ETH Physics

born on January 23, 1991

Citizen of Zurich

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Elgar Fleisch, examiner

Prof. Dr. Frédéric Thiesse, co-examiner

Ass.-Prof. Dr. Felix Wortmann, co-examiner

2020

Abstract

Over the last decades, the Internet of Things (IoT) has emerged as a vision of the computer of the 21st century, in which virtually any computing device could be connected to the Internet. Recently, this vision of ubiquitous computing has started to become reality and billions of connected things are deployed today, from smart home devices to cars to industrial machinery. For the coming years ahead, the number of these connected devices is projected to continue to grow at a rapid speed. The current stage of the IoT is characterized by the focus on things which are simply *connected* to the Internet and *generate data* which, in turn, enables new products, services and business models. Recently, technological progress has shifted the focus towards *interconnected* things which can *interpret data*, leading to an enhanced vision for the IoT called the Economy of Things (EoT). The EoT refers to a world in which IoT devices become increasingly intelligent things that are acting as autonomous agents in an economic system, instead of simply sensing, processing and exchanging data. In this context, devices are interconnected, exchanging data directly between each other in a peer-to-peer network, and intelligent in the sense that they can analyze available data and leverage this information to make decisions autonomously. A great showcase for an EoT application is the idea of robo-taxis, which autonomously drive around, spot passengers or parking options and settle payments with them, decide which workshops to go to for repairs and save money to buy an additional version of themselves, meaning another robo-taxi for the fleet.

The vision of the EoT is nurtured by technological developments which could build the infrastructural foundation for broader decentralization and disintermediation. In particular, a broad range of research scholars and practitioners alike argue that blockchain technology is a promising means to strengthen existing tendencies of disintermediation and build the technological foundation for the EoT. In this context, especially relevant properties of blockchains are the possibility to transact value (e.g., via cryptocurrencies) or incorporate business logic (e.g., via smart contracts) in an automated manner independent of intermediaries. In fact, the decentralized nature of blockchain technology allows trustless interactions and makes it possible to use a blockchain as a shared, secure computing platform between distrustful or anonymous agents. Ultimately, this enables commercial activities between unknown agents, humans or things, which is the fundamental basis of an EoT. Widely discussed use cases are, for example, machine-to-machine coordination and sensor data markets, where sensor devices sell data autonomously based on a set of economic rules. While blockchain technology has been widely

cited as a promising contender to pave the way towards an EoT, the existing body of knowledge that substantiates these claims is still in its infancy.

In this dissertation, we explore the role of blockchain technology as a potential infrastructure layer for such a visionary EoT. In particular, we concentrate on two fundamental and related aspects regarding this enquiry. First, we focus on the role of blockchain-based decentralized applications (DApps) for the EoT. The basis for all actions in the decentralized ecosystem of an EoT is trustworthy data. In particular, as things become more autonomous and base complex decisions on data they have acquired from other potentially unknown sources, it is essential that such data be reliable. As many IoT systems handle especially sensitive personal or enterprise information, preserving the privacy during storage and exchange of such data is particularly relevant. Consequently, we investigate how DApps can facilitate the reliable gathering and exchange of IoT data in a privacy-preserving manner and under what circumstances blockchain technology might or might not help to achieve this. For this, we conduct a comprehensive design science study, and develop an instantiation of a sensor data protection system which is tested in a four-month field test with 100 participating cars.

Second, we focus on the underlying system of decentralized finance (DeFi) which supports the development of DApps. While DApps might enable foundational applications for the EoT, only DeFi provides the financial infrastructure to turn things into economic agents. To date, DeFi has led to a number of basic and more complex financial products, of which blockchain-based fundraising has received the largest adoption. In fact, this mechanism is often used to fund the development of DApps and is responsible for a large amount of all investments made towards the whole blockchain ecosystem. Consequently, we examine the mechanism of blockchain-based fundraising and study particularly how investors leverage available information for their decisions. For this, we collect and analyze the financial data as well as information from discussion forums and microblogs for 95 successful fundraises. As such, this dissertation contributes to the emerging stream of literature on blockchain technology and its application in the context of the EoT. In particular, we develop a set of core design guidelines for DApps to facilitate the purposeful implementation of systems for IoT sensor data protection. Furthermore, we enrich these guidelines to form a holistic design theory and explicitly reflect the role of blockchain technology for the realization of individual components. Additionally, we present first analyses on the relevance of different information types for investors that fund the development of DApps. We synthesize our results and deduce relevant learnings for both research and practice and, finally, conclude with the limitations of this work and an outlook on future research.

Zusammenfassung

Über die letzten Jahrzehnte hat sich das Internet der Dinge, aus dem Englischen Internet of Things (IoT), als eine Vision des Computers des 21. Jahrhunderts herausgebildet, in der praktisch jedes Computer-Gerät mit dem Internet verbunden wird. In den letzten Jahren ist diese Vision Realität geworden und Milliarden von vernetzten Dingen werden heute eingesetzt, von intelligenten Heimgeräten über Autos bis hin zu Industriemaschinen. Für die kommenden Jahre wird prognostiziert, dass die Zahl dieser vernetzten Geräte weiterhin mit rasanter Geschwindigkeit wachsen wird. Die gegenwärtige Phase des IoT ist gekennzeichnet durch Dinge, die einfach *mit dem Internet verbunden* sind und *Daten erzeugen*, welche wiederum neue Produkte, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle ermöglichen. In letzter Zeit hat der technologische Fortschritt den Schwerpunkt vermehrt auf *miteinander verbundene* Dinge verlagert, die *Daten interpretieren* können, was zu einer erweiterten Vision des IoT geführt hat, die im Englischen als Economy of Things (EoT) bezeichnet wird. Die EoT bezieht sich auf eine Welt, in der IoT-Geräte zu immer intelligenteren Dinge werden, die als autonome Agenten in einem Wirtschaftssystem agieren, anstatt einfach nur Daten zu erfassen, zu verarbeiten und auszutauschen. In diesem Zusammenhang sind die Geräte miteinander verbunden, tauschen Daten direkt untereinander in einem Peer-to-Peer-Netzwerk aus und sind in dem Sinne intelligent, dass sie verfügbare Daten analysieren und diese Informationen nutzen können, um autonome Entscheidungen zu treffen. Ein gutes Beispiel für eine EoT-Anwendung ist die Idee von Robo-Taxis, die autonom umherfahren, Passagiere oder Parkmöglichkeiten ausfindig machen und Zahlungen abwickeln, entscheiden, welche Werkstätten sie für Reparaturen aufsuchen, und Geld sparen, um eine zusätzliche Version von sich selbst zu kaufen, also ein weiteres Robo-Taxi für die eigene Flotte.

Die Vision des EoT wird von technologischen Entwicklungen getrieben, welche die grundlegende Infrastruktur für eine vermehrte Dezentralisierung bilden könnten. Ein breites Spektrum von Forschern und Praktikern argumentiert, dass die Blockchain Technologie ein vielversprechendes Mittel ist, um bestehende Tendenzen der Dezentralisierung zu verstärken und die technologische Grundlage für das EoT zu schaffen. In diesem Zusammenhang sind besonders relevante Eigenschaften von Blockchains die Möglichkeiten, Geld auszutauschen (z.B. über Kryptowährungen) oder Geschäftslogik abzuwickeln (z.B. über intelligente Verträge) und zwar automatisiert und unabhängig von Intermediären. Tatsächlich erlaubt die dezentrale Natur der Blockchain Technologie Interaktionen ohne Vertrauen in die beteiligten Parteien und macht es möglich, eine Blockchain als gemeinsame, sichere Computerplattform zwischen misstrauischen

oder anonymen Agenten zu nutzen. Letztendlich ermöglicht dies kommerzielle Aktivitäten zwischen unbekanntem Agenten, Menschen oder Dingen, was die fundamentale Grundlage einer EoT ist. Breit diskutierte Anwendungsfälle sind z.B. die Koordination von Maschinen untereinander oder Sensordatenmärkte, bei denen Sensoren auf der Grundlage einer Reihe wirtschaftlicher Regeln autonom Daten verkaufen. Während das Potential der Blockchain Technologie für die Infrastruktur einer EoT weithin als gross angesehen wird, sind wissenschaftliche Studien, welche diese Aussagen belegen, noch in den Anfängen.

In dieser Dissertation untersuchen wir die Rolle der Blockchain Technologie als potenzielle Infrastruktur für eine solche visionäre EoT. Insbesondere konzentrieren wir uns dabei auf zwei grundlegende und verwandte Aspekte. Erstens fokussieren wir uns auf die Rolle von Blockchain-basierten dezentralen Anwendungen, im Englischen Decentralized Applications (DApps) genannt, für die EoT. Die Grundlage für alle Handlungen im dezentralisierten Ökosystem einer EoT sind vertrauenswürdige Daten. Insbesondere je autonomer Dinge agieren und je komplexere Entscheidungen sie treffen, basierend auf Daten aus potenziell unbekanntem Quellen, desto wichtiger ist es, dass diese Daten vertrauenswürdig sind. Da viele IoT-Systeme besonders sensible persönliche oder geschäftliche Informationen verarbeiten, ist die Wahrung der Privatsphäre bei der Speicherung und beim Austausch solcher Daten besonders relevant. Daher untersuchen wir, wie DApps die zuverlässige Sammlung und den Austausch von IoT-Daten unter Wahrung der Privatsphäre ermöglichen können und unter welchen Umständen die Blockchain Technologie dabei helfen kann oder nicht. Dazu führen wir eine umfassende wissenschaftliche Design Studie durch und entwickeln ein Sensordaten-Schutzsystem, das in einem viermonatigen Feldtest mit 100 teilnehmenden Fahrzeugen getestet wird.

Zweitens konzentrieren wir uns auf das dezentrale Finanzsystem, aus dem Englischen Decentralized Finance (DeFi), das die Entwicklung von DApps unterstützt. Während DApps grundlegende Anwendungen für die EoT ermöglichen könnten, bietet nur DeFi die finanzielle Infrastruktur, um Dinge zu Wirtschaftsakteuren zu machen. Bis heute hat DeFi zu einer Reihe grundlegender und komplexerer Finanzprodukte geführt, von denen die Blockchain-basierte Unternehmensfinanzierung am meisten benutzt wurde. Dieser Mechanismus wird häufig zur Finanzierung der Entwicklung von DApps eingesetzt und ist für einen Grossteil aller Investitionen verantwortlich, die in das gesamte Blockchain-Ökosystem geflossen sind. Folglich untersuchen wir den Mechanismus der Blockchain-basierten Unternehmensfinanzierung und erforschen insbesondere, wie Investoren verfügbare Informationen für ihre Entscheidungen nutzen. Dazu sammeln und analysieren wir die Finanzdaten sowie Informationen aus online Diskussionsforen und Mikroblogs für 95 erfolgreiche Finanzierungsrunden. Damit leistet diese Dissertation einen Beitrag zur Literatur über die Blockchain Technologie und ihre Anwendung im Kontext des EoT.

Insbesondere entwickeln wir eine Reihe von Designrichtlinien für DApps, um die zielgerichtete Implementierung von Systemen zum Schutz von IoT-Sensordaten zu erleichtern. Darüber hinaus erweitern wir diese Richtlinien zu einer ganzheitlichen Designtheorie und reflektieren explizit die Rolle der Blockchain Technologie für die Realisierung einzelner Systemkomponenten. Zusätzlich präsentieren wir erste Analysen zur Relevanz verschiedener Informationstypen für Investoren, die die Entwicklung von DApps finanzieren. Wir fassen unsere Ergebnisse zusammen und leiten daraus relevante Erkenntnisse für Forschung und Praxis ab und schliessen mit den Einschränkungen dieser Arbeit und einem Ausblick auf die zukünftige Forschung.