



Hochschule Darmstadt
- FACHBEREICH INFORMATIK -

Permissioned Blockchains für B2B

Prototypische Implementierung eines dezentralisierten Wartungsmarktes

Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science (B.Sc.)

vorgelegt von
Eric Nagel
Matrikelnummer

Referent:	Prof. Dr. Andreas Müller
Korreferent:	Björn Bär

Zusammenfassung

Traditionelle B2B-Anwendungen, mit multiplen Unternehmen als Teilnehmer, bringen Probleme bezüglich der Datenhaltung mit sich. So besteht die Möglichkeit, dass jedes Unternehmen Daten bei sich selber speichert. Dies führt jedoch zu zusätzlichem Aufwand, da Schnittstellen eingerichtet werden müssen, um Geschäftspartnern Zugriff auf relevante Daten zu gewähren. Eine weitere Option ist die Speicherung bei einer zentralen, verwaltenden Instanz. Jeder Geschäftspartner müsste dieser jedoch vertrauen, was die Anwendung unattraktiver macht. Eine Lösung für diese Probleme könnte die Blockchain-Technologie darstellen. Mit ihr ist eine verteilte Datenspeicherung unter nicht vertrauenswürdigen Teilnehmern möglich. Dabei stellt die Blockchain sicher, dass die Daten bei allen Geschäftspartnern synchron sind, und nicht manipuliert oder gelöscht werden können. Die Technologie bringt jedoch auch Schwierigkeiten mit sich, welche für B2B-Anwendungen unerwünscht sind. In Public Blockchains wie Bitcoin und Ethereum äußert sich dies anhand der Skalierbarkeit, Performance und Sicherheit. Permissioned Blockchains, wie Hyperledger Fabric, können diese Probleme zu Teilen lösen. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde ein Prototyp eines automatisierten dezentralen Wartungsmarktes als Proof-of-Concept entwickelt. In diesen können IoT-Geräte Wartungsbedarf erkennen und Wartungsanbieter darauf reagieren. Letztendlich lässt sich sagen, dass die Entwicklung mit Permissioned Blockchains noch Komplikationen mit sich bringt, und dass weitere zukünftige Evaluation der Technologie nötig ist, um eine endgültige Aussage über den Nutzen von Blockchains im B2B-Bereich zu treffen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	vi
1 Einführung und Motivation	1
2 Grundlagen	2
2.1 Blockchain Grundlagen	2
2.1.1 Funktionsweise	2
2.1.2 Blockchaintypen	9
2.1.3 Exemplarische Anwendungsfälle	9
2.2 Anforderungen an B2B-Anwendungen	11
3 Aktueller Stand der Technik	12
4 Evaluierung Permissioned Blockchains für B2B	14
4.1 Skalierbarkeit	14
4.1.1 Public Blockchains	14
4.1.2 Ethereum	16
4.1.3 Permissioned Blockchains	18
4.2 Konsensmechanismen	20
4.2.1 Proof of Stake	20
4.2.2 Proof of Elapsed Time	21
4.2.3 Diversity Mining Consensus	21
4.2.4 QuorumChain	21
4.2.5 Practical Byzantine Fault Tolerance	22
4.2.6 Tendermint	23
4.2.7 Sonstige BFT-Konsensmechanismen	23
4.3 Sonstige Einschränkungen	23
4.3.1 Private Transaktionen	23
4.3.2 Datenmenge	24
4.4 Fazit	24

5	Umsetzung eines dezentralen Wartungsmarktes	26
5.1	Konzept und Anforderungen	26
5.2	Technologieauswahl	27
5.3	Hyperledger Fabric und Composer - Grundlagen	28
5.3.1	Hyperledger Fabric	28
5.3.2	Hyperledger Composer	30
5.4	Entwicklungsumgebung	30
5.5	Business Network Definition	30
5.5.1	Anwendungslogik	31
5.5.2	Installation	36
5.6	Client Applications	36
5.6.1	REST-API	36
5.6.2	Webanwendungen	36
5.6.3	XDK-Trigger	39
5.7	Netzwerkkonfiguration	39
5.7.1	Fabric-Netzwerk-Konfiguration	40
5.7.2	Composer-Konfiguration	42
5.8	Konsensmechanismus	42
5.9	Showcase-Demo	42
6	Fazit und Ausblick	46

Abbildungsverzeichnis

2.1	Verkettung von Blöcken durch Block Header Hashes [9].	3
2.2	Signieren und Verifizieren von Nachrichten. Der Sender signiert die Nachricht mit seinen Private Key und der Empfänger kann diese mit den Public Key des Senders verifizieren [11].	4
2.3	Fork-Visualisierung - Vor dem Fork besitzen alle Nodes Block O als letzten Block [4].	6
2.4	Fork-Visualisierung - zwei Nodes finden zur ungefähr gleichen Zeit einen Block und verbreiten ihn im Netzwerk, womit zwei Versionen der Blockchain bestehen [4].	6
2.5	Fork-Visualisierung - Eine Node, welche Block A zuerst erhalten hat, hängt daran einen neuen Block C an [4].	7
2.6	Fork-Visualisierung - Block C verbreitet sich im Netzwerk, rote Nodes sehen zwei Blockchains und akzeptieren die längere [4].	7
4.1	Möglicher Transaktionsdurchsatz bei Bitcoin, Ethereum, Paypal und Visa [45]. .	15
4.2	Auswahl der gültigen Blockchain. Bei Bitcoin die längere. Bei Ethereum die mit der meisten erbrachten Arbeit, unter Einberechnung der Uncle-Blocks [48]. . . .	16
4.3	Vergleich des Transaktionsdurchsatzes von Ethereum und Hyperledger Fabric [23].	19
5.1	Generierte REST-API zu der BND. GET und POST Requests werden für Datenabfragen sowie das Ausführen von Transaktionen genutzt.	37
5.2	Angular-Maintenance-App. Vom Wartungsdienstleistern zum Verwalten der Wartungsverträge genutzt.	37
5.3	High-Level-Architektur des zu entstehenden Fabric-Netzwerks	41
5.4	Architektur der Demo-Komponenten	43
5.5	Workflow für die Wartung.	44
5.6	Workflow für die Preisabsprache.	45

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich der Blockchaintypen mit Datenbanksystemen. Die erwähnten BFT- Protokolle werden genauer im Kapitel 4.2 erläutert [2][7].	9
5.1	Vergleich diverser Permissioned Blockchain Plattformen [21][63]	28

Listingverzeichnis

5.1	Modellierung einer Machine. Keys können primitive Datentypen oder Referenzen zu anderen Assets sein.	31
5.2	Modellierung eines MaintenanceContract.	32
5.3	Modellierung der AddPerformedStep-Transaktion. Die Keys sind in diesem Fall die mit der Transaktion übergebenen Parameter.	32
5.4	Modellierung eines Events, welches ausgelöst wird wenn ein neuer Vertrag erstellt wird.	33
5.5	JavaScript-Code für die AcceptMaintenanceContract-Transaktion	34
5.6	Auszug aus der InitMaintenance-Transaktion. Ein Event wird gesendet, nachdem ein neuer Vertrag erstellt wurde.	35
5.7	Auszug aus der InitMaintenance-Transaktion. Ein Event wird emittet.	35
5.8	Abfrage aller existierenden Wartungsverträge	38
5.9	Abfrage aller existierenden Wartungsverträge	38
5.10	Abfrage aller existierenden Wartungsverträge	38
5.11	Erstellen eines Wartungsvertrags bei der Überschreitung des Luftfeuchtigkeits-schwellwertes.	40
5.12	Konfiguration des Fabric-Netzwerks (Verkürzt).	41

Kapitel 1

Einführung und Motivation

Klassische B2B-Anwendungen bringen Probleme hinsichtlich der Datenhaltung mit sich. Eigene Daten können bei jedem Geschäftspartner selber gespeichert werden, was jedoch den Zugriff auf diese, aufgrund von aufwendig einzurichtenden Schnittstellen und uneinheitlichen Datenformaten, erschwert. Eine andere Möglichkeit ist die Speicherung bei einem zentralen Unternehmen. Dieses hätte jedoch die Kontrolle über die Daten, womit alle anderen Parteien diesem vertrauen müssten. Diese Faktoren machen B2B-Anwendungen für die Teilnehmer unattraktiv und erschweren die Entwicklung [1] [2].

Um diese Probleme zu lösen, wird ein Prototyp einer dezentralen B2B-Applikation basierend auf der Blockchain-Technologie entwickelt. Sie erlaubt es dezentrale Systeme aufzubauen, in welchen sich die Parteien nicht vertrauen. Alle Daten würden bei jedem Teilnehmer des Blockchain-Netzwerks (In der weiteren Arbeit nur noch Netzwerk genannt) gespeichert werden. Trotzdem sind diese nicht löscht- oder manipulierbar, alle Transaktionen sind lückenlos nachvollziehbar und es besteht ein gemeinsamer Konsens über den Datenbestand [3].

Bekannte Blockchain-Implementationen, wie Bitcoin oder Ethereum, bringen jedoch Probleme mit sich, welche im B2B-Bereich von Nachteil sind. So sind alle Daten öffentlich einsehbar, der Transaktionsdurchsatz ist gering und die Konsensmechaniken sind unter bestimmten Umständen unsicher und resultieren in hohem Energieverbrauch [4][5][6].

Ziel dieser Arbeit ist es, die Probleme der Blockchain-Technologie für den B2B-Bereich zu analysieren und basierend auf den Ergebnissen die Entwicklung einer dezentralen B2B-Anwendung zu beschreiben sowie zu evaluieren. Dazu werden zunächst die grundlegenden Konzepte der Blockchain-Technologie erklärt, um ein besseres Verständnis für die Vor- und Nachteile dieser zu erhalten. Anschließend werden die Probleme für B2B-Anwendungen anhand der Anforderungen an den Wartungsmarkt genauer betrachtet und analysiert. Daraufhin erfolgt die Beschreibung der Anwendungsentwicklung. Zuletzt wird ein Fazit zur Lösung der Probleme und des entwickelten Systems gezogen.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Blockchain Grundlagen

2.1.1 Funktionsweise

Die Funktionsweise der Blockchain wird hauptsächlich an Bitcoin erklärt. Als erste Blockchain-Anwendung [7] und aufgrund der relativ geringen Komplexität liefert es die Grundlage für die Funktion der Technologie. Andere Implementationen, wie Ethereum oder Ripple, funktionieren nach dem gleichen Prinzip.

2.1.1.1 Allgemein

Wenn der Begriff “Die Blockchain” auftaucht, ist damit meistens die Blockchain-Technologie gemeint. Es gibt nicht nur eine global bestehende Blockchain und auch nicht nur eine Implementation der Technologie, was man an Bitcoin oder Ethereum sehen kann.

Allgemein kann man die Blockchain als Datenstruktur bezeichnen, welche verteilt, nicht löschar und unmanipulierbar gespeichert werden kann. Weiterhin verifizieren jegliche Teilnehmer am Netzwerk ausgeführte Transaktionen, womit ein gemeinsamer Konsens über den Datenbestand besteht [3].

In einer Blockchain werden Transaktionen in Blöcken gespeichert. Dabei handelt es sich um Operationen, welche Daten erstellen, verändern, oder löschen. Aus diesen lässt sich letztendlich der aktuelle Datenbestand ermitteln. So erfolgt z.B. bei Bitcoin keine Speicherung des aktuellen Guthabens der Teilnehmer. Es wird nur aus allen bestehenden Transaktionen berechnet [4]. Die Daten welche letztendlich bestehen, können z.B. Geldtransferinformationen (Bitcoin), Smart Contracts (Ethereum, selbstausführende Verträge mit selbst erstellter Programmlogik, siehe 2.1.3), oder simple Dokumente oder Informationen sein [6][5][8]. Die Blöcke setzen sich zusammen aus den Transaktionen sowie den Block Header, welcher verschiedene Metadaten, wie zum Beispiel den kombinierten Hash¹ aller Transaktionen, enthält [4].

¹Hash: Ergebnis einer Operation, welche “eine Zeichenfolge beliebiger Länge auf eine Zeichenfolge mit fester Länge abbildet” [4].

Die Blöcke sind miteinander verkettet. Jeder Block Header enthält den Hash des vorherigen Block Headers (siehe Abb. 2.1). Dies ist ein wichtiges Feature zum Schutz der Blockchain vor Angriffen. Wenn ein Angreifer die Transaktionen eines Blocks zu seinen Gunsten verändern würde, würde sich der Hash des Block Headers ändern. Dieser müsste dann im darauffolgenden Block Header stehen, womit sich allerdings auch der Hash dieses Blocks ändert. Letztendlich müssten alle folgenden Blöcke manipuliert werden, um eine gültige Blockchain zu erhalten [5]. Diese Manipulation wird durch verschiedene Verfahren erschwert, welche genauer in den Kapiteln 2.1.1.1 und 2.1.1.3 erklärt werden.

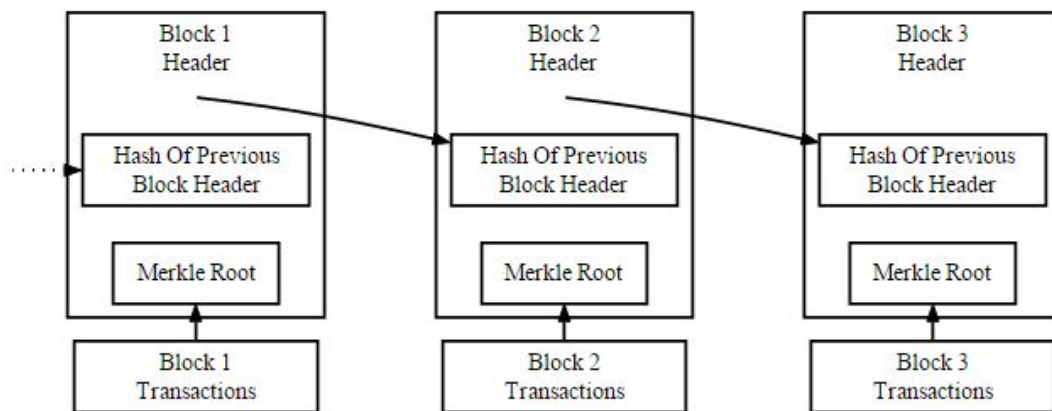


Abbildung 2.1: Verkettung von Blöcken durch Block Header Hashes [9].

Die Blockchain ist verteilt gespeichert. Jeder Teilnehmer hat die Möglichkeit Sie auf seinen Rechner zu speichern. Somit besteht keine zentrale Instanz, welche die Kontrolle über die Daten hat. Weiterhin gibt es keinen Single Point of Failure² [3].

2.1.1.2 Konsensmechanismen

Aufgrund der verteilten Datenhaltung muss es Verfahren geben, um die Daten synchron, und auf einen Stand, auf welchen sich alle Teilnehmer geeinigt haben, zu halten. Dazu gibt es die sogenannten Konsensmechanismen, welche gleichzeitig die Unmanipulierbarkeit der Daten sicherstellen. Bevor diese erklärt werden können, muss zunächst genauer auf die Funktion des Netzwerks eingegangen werden.

Funktion des Netzwerks Wenn ein Teilnehmer eine Transaktion ausführt, wird diese, vorausgesetzt dass sie valide ist (Genauer im nächsten Absatz erklärt), an alle Nodes³ im Netzwerk weitergeleitet und im Transaktionspool aufgenommen. Dieser enthält alle noch nicht in Blöcken vorkommenden Transaktionen. Diese werden in einen neuen Block aufgenommen, und jede Node beginnt mit der Erstellung von diesem. Das Erstellen wird durch verschiedene Konsensme-

²Single Point of Failure: Komponente eines Systems, dessen Ausfall den Ausfall des gesamten Systems bewirkt [4].

³Node: Teilnehmer eines Blockchain-Netzwerks, welche die Blockchain speichern. Auch Peers genannt.

chaniken realisiert. Bei Bitcoin und Ethereum findet der PoW (im folgenden PoW genannt) Anwendung (weiter unten genauer unter erklärt). Sobald eine Node einen Block erstellt, wird dieser im Netzwerk verteilt. Jede Node hängt ihn an ihre lokale Blockchain an, und beginnt mit der Erstellung des nächsten Blocks [4].

Damit eine Transaktion valide ist, muss sie bestimmte Voraussetzungen erfüllen. So muss sie unter anderen mit den Private Key des Senders signiert sein. Mittels seines Public Keys kann überprüft werden, ob wirklich er der Sender der Nachricht ist und ob die Transaktion manipuliert wurde. Dieses Verfahren wird auch in der Abbildung 2.2 visualisiert. Das Signieren trägt zur Sicherheit der Blockchain bei, da ein Angreifer somit keine Transaktionen manipulieren oder im Namen eines anderen ausführen kann. In Bitcoin ist eine weitere Kondition, dass der Transaktionsersteller die zu sendenden Bitcoins besitzt [4]. In Systemen wie Ethereum und Hyperledger Fabric, in welchen eigene Programmlogik abgebildet werden kann, können weitere Konditionen festgelegt werden. So muss z.B. ein Teilnehmer die nötigen Rechte haben um eine Transaktion auszuführen [10].

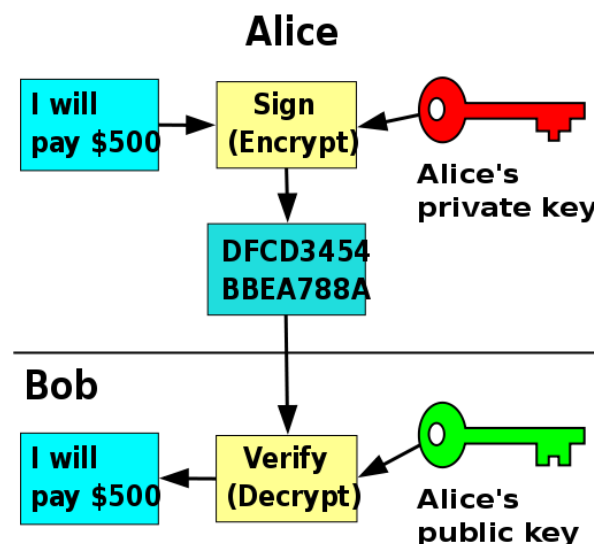


Abbildung 2.2: Signieren und Verifizieren von Nachrichten. Der Sender signiert die Nachricht mit seinen Private Key und der Empfänger kann diese mit den Public Key des Senders verifizieren [11].

Proof-of-Work Der Proof-of-Work (PoW) ist nur einer der zur Verfügung stehenden Konsensmechanismen (siehe Kapitel 4.2). Er bedarf jedoch genauerer Erklärung, da er in aktuellen Blockchain-Implementationen vorwiegend genutzt wird. Der PoW ist eine Art Rätsel, welches mit der Rechenleistung von Nodes gelöst werden muss, um einen Block zu erschaffen (das sogenannte Mining). Genauer gesagt, muss für einen Block ein Hash gefunden werden, welcher einen bestimmten Wert unterschreitet. Desto kleiner dieser ist, desto höher ist die Schwierigkeit. Um wachsender Rechenleistung und Teilnehmerzahl entgegen zu wirken, also die Zeit für die

Erstellung eines Blockes ungefähr gleich zu halten, kann die Schwierigkeit angepasst werden. Dies ist aufgrund verschiedener Faktoren nötig, welche genauer im Kapitel 4 erläutert werden. Um unterschiedliche Hashwerte für gleiche Blöcke zu erhalten, gibt es im Block Header eine Nonce⁴, welche verändert wird [5]. Alle Nodes im Bitcoin-Netzwerk benötigen im Durchschnitt 10 Minuten um einen PoW zu erbringen [4], bei einer Hash Rate⁵ von ca. 13.000.000 TH/s (Terrahashes pro Sekunde) [13]. Bei Ethereum beträgt die Zeit ungefähr 15 Sekunden [14], bei einer Hash Rate von ca. 150 TH/s [13]. Spezielle Hardware für das Mining erreicht eine Hashrate von bis zu 13,5 TH/s [15]. Damit die Nodes eine Motivation haben, Rechenleistung für das Erstellen von Blöcken zu nutzen, erhalten sie bei Erbringung des PoW eine Belohnung, sowie die Transaktionsgebühren in Form von Kryptowährung. In Verbindung mit den Mining sind auch Mining Pools zu erwähnen. Dabei handelt es sich um einen Zusammenschluss von Minern, welche probieren den PoW zu erbringen. Gelingt dies, wird die Belohnung zwischen allen Teilnehmern im Pool geteilt. [5] [6].

Forking Um vollständig zu verstehen, wie der PoW funktioniert, muss das Forking erklärt werden. Wenn eine Node einen PoW erbringt, also einen Block erstellt, wird dieser an alle anderen Nodes weitergeleitet. Im Bitcoin-Netzwerk dauert es bei einer maximalen Blockgröße von 1MB [4], zwischen 6 und 20 Sekunden, bis ein Block mindestens 90% aller Nodes erreicht hat [16]. Dies stimmt auch mit den Paper von Decker und Wattenhofer überein, wo eine durchschnittliche Zeit von 12,6 Sekunden angegeben wird, bis ein Block 95% aller Nodes erreicht [17]. In dieser Zeit kann es vorkommen, dass eine weitere Node einen Block erstellt. Auch dieser wird im Netzwerk verteilt, womit zwei Versionen der Blockchain existieren: Eine endet mit Block A, und die andere mit Block B. Dies ist der sogenannte Fork. Das Netzwerk muss sich nun darauf einigen, welche der beiden Versionen beibehalten werden soll. Deshalb gilt: Die Blockchain in welche mehr Arbeit eingeflossen ist, ist die gültige. Im Falle von Bitcoin wäre dies die längere Blockchain. Die Nodes probieren an den zuerst erhaltenen Block (A oder B) einen neuen anzuhängen. Gelingt dies, ist eine der beiden Blockchains länger als die andere. Diese wird dann von allen Nodes als die richtige akzeptiert. Dieser Vorgang wird auch in den Abbildungen 2.3 bis 2.6 dargestellt. Theoretisch ist es möglich, dass ein Fork über mehrere Blöcke besteht. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist jedoch gering, da mehrmals nacheinander mindestens zwei Nodes zur ungefähr gleichen Zeit einen Block erstellen müssen. Auch zu erwähnen ist, dass in einem Fork-Branch weitere Forks entstehen können. Diese Forks sind der Grund, warum Transaktionen erst als bestätigt gelten, sobald sie in einem Block stehen, welcher eine gewisse Anzahl an Nachfolgern hat. Denn erst dann ist die Sicherheit gegeben, dass die Transaktion nicht in einem Fork vorhanden ist, welcher eventuell verworfen wird [4]. Wie genau der PoW das Netzwerk absichert, wird im Kapitel 2.1.1.3 erklärt.

Neben dem PoW gibt es noch weitere Konsensmechanismen, wie Proof-of-Stake, Proof-of-

⁴Nonce: Eine "Zahlen- oder Buchstabenkombination, die nur ein einziges Mal in einem jeweiligen Kontext verwendet wird"[4].

⁵Hash Rate: Anzahl der in einer Zeiteinheit berechneten Hashwerte [12].

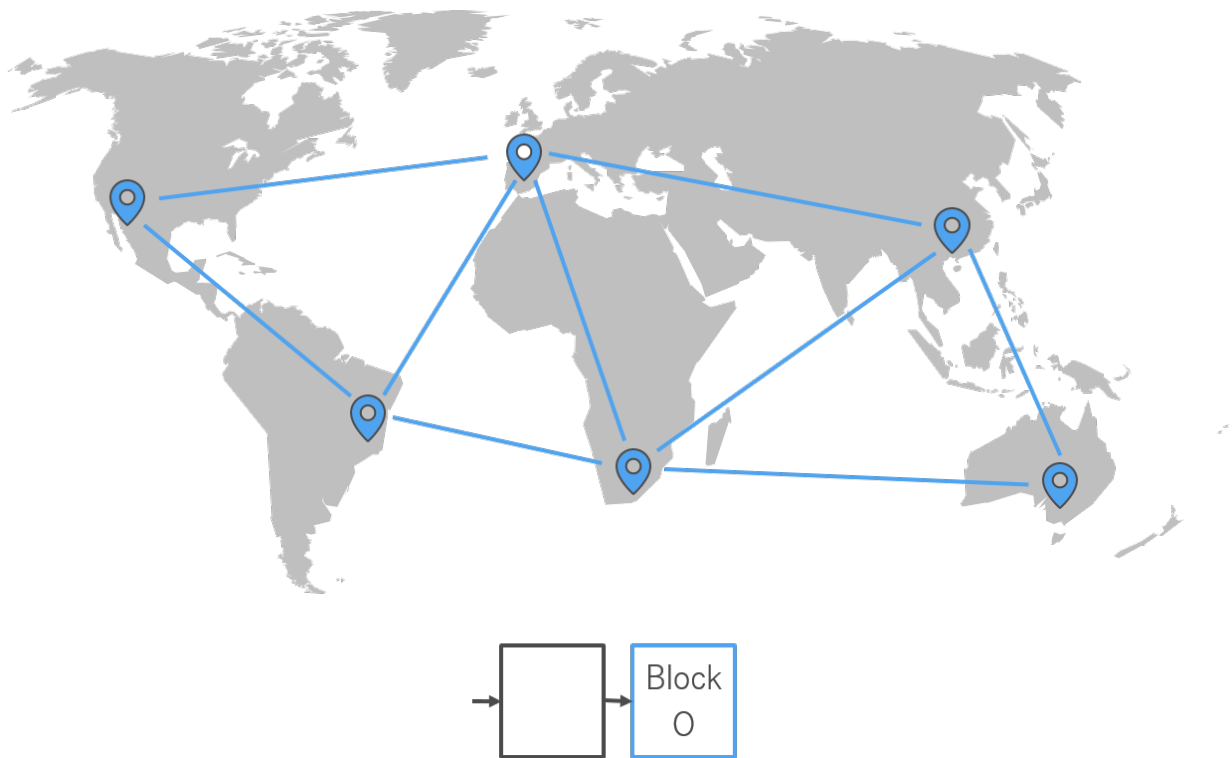


Abbildung 2.3: Fork-Visualisierung - Vor dem Fork besitzen alle Nodes Block 0 als letzten Block [4].

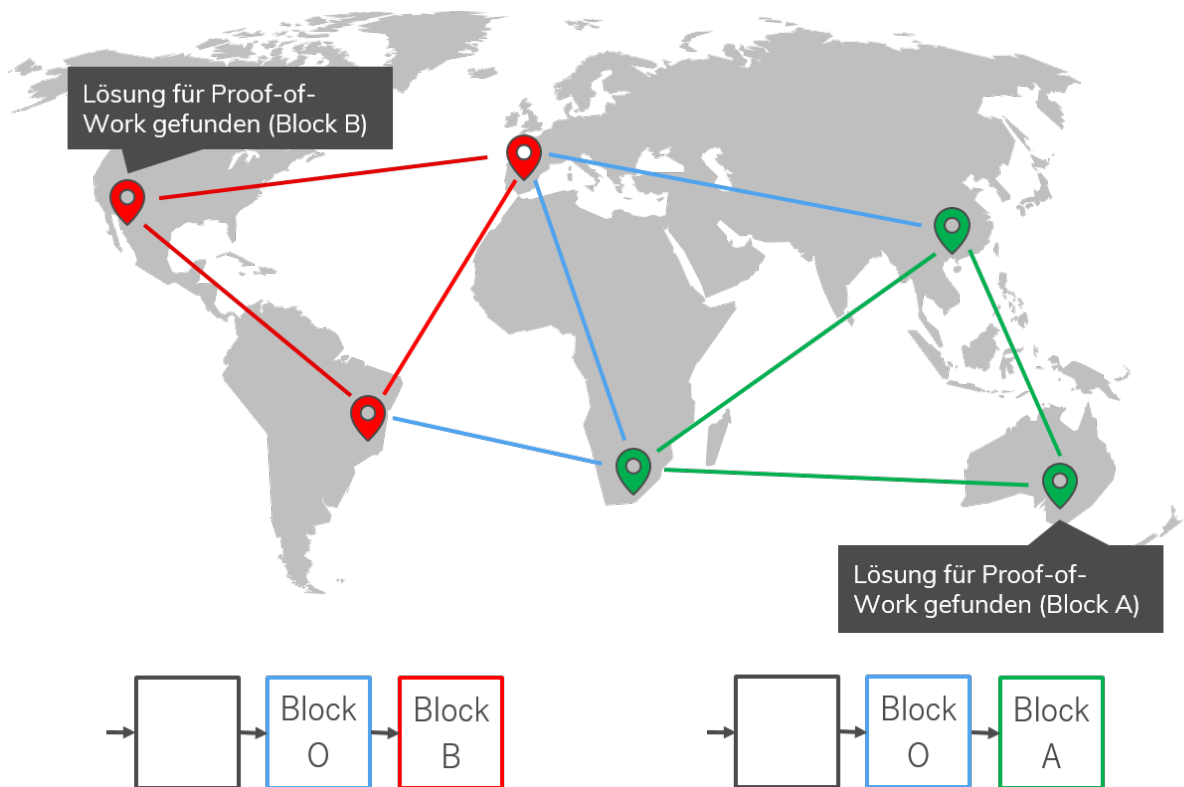


Abbildung 2.4: Fork-Visualisierung - zwei Nodes finden zur ungefähr gleichen Zeit einen Block und verbreiten ihn im Netzwerk, womit zwei Versionen der Blockchain bestehen [4].

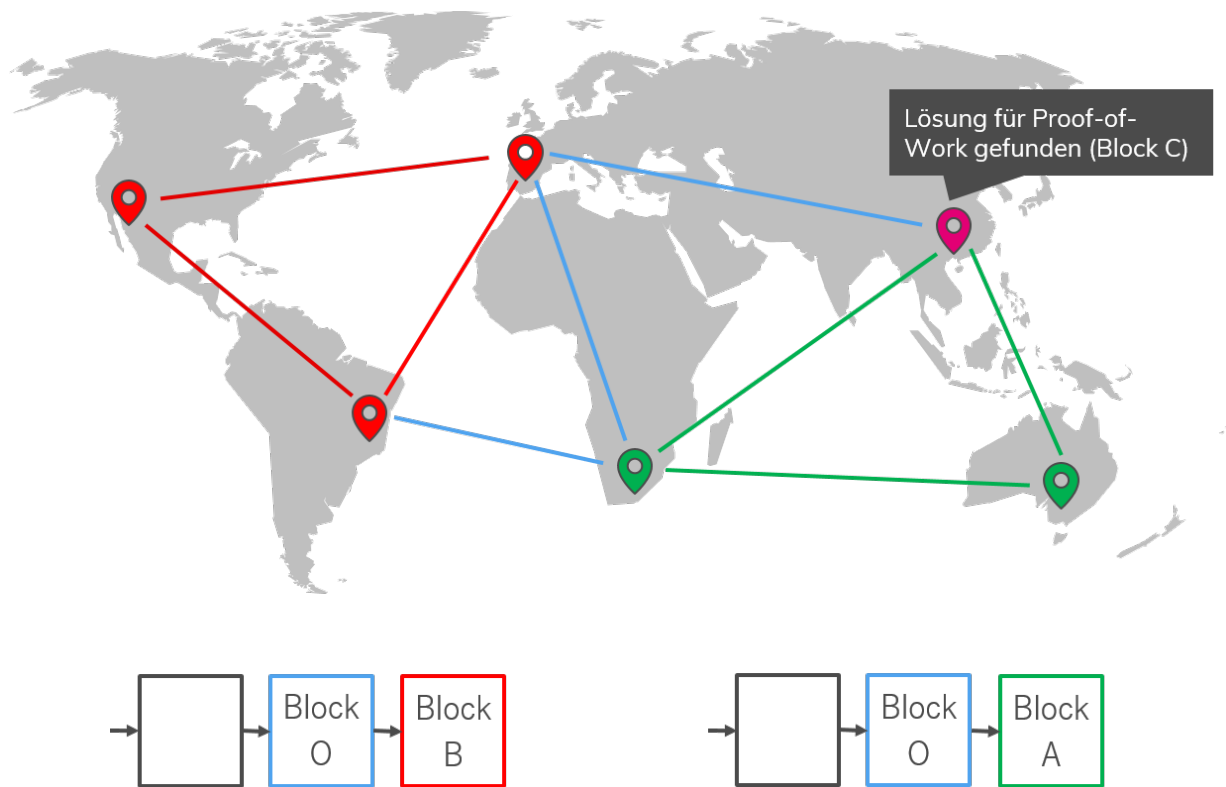


Abbildung 2.5: Fork-Visualisierung - Eine Node, welche Block A zuerst erhalten hat, hängt daran einen neuen Block C an [4].

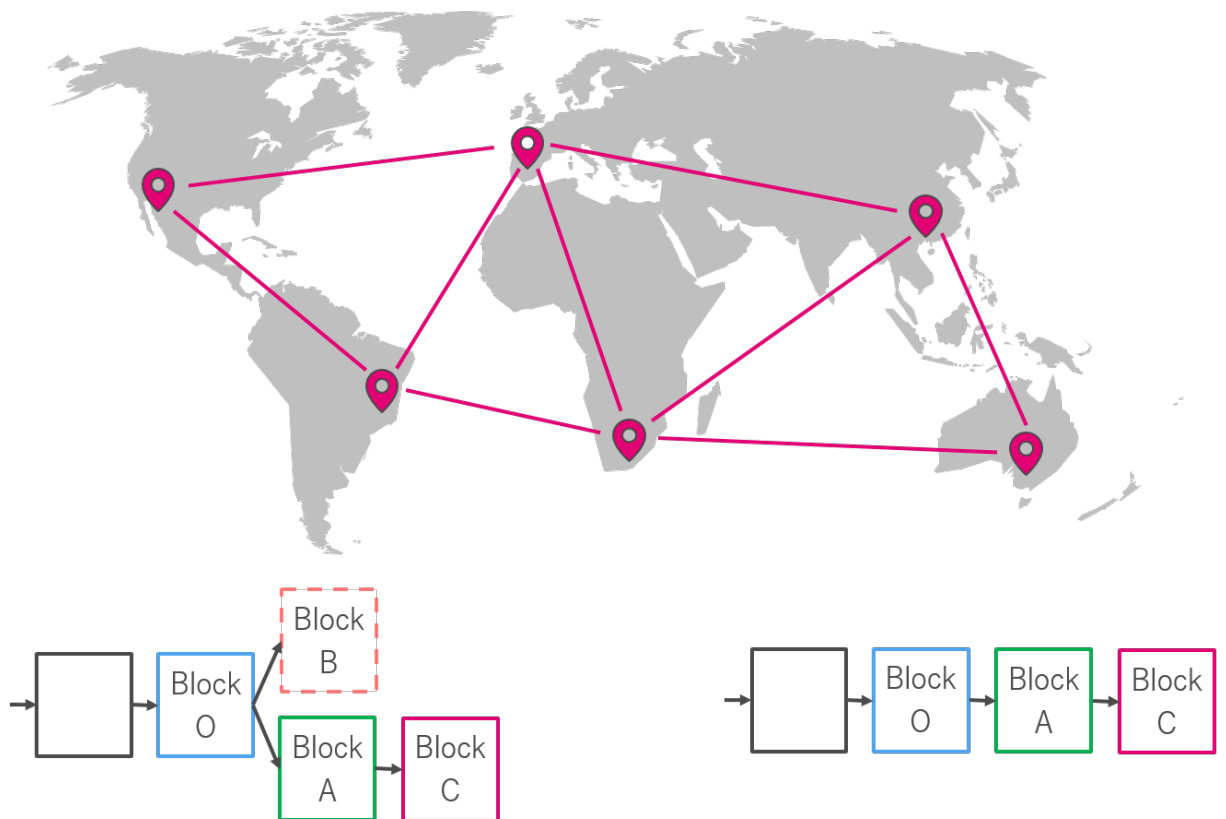


Abbildung 2.6: Fork-Visualisierung - Block C verbreitet sich im Netzwerk, rote Nodes sehen zwei Blockchains und akzeptieren die längere [4].

Authority oder Practical Byzantine Fault Tolerance [18], [19] . Diese werden im Kapitel 4.2 genauer beschrieben und analysiert.

2.1.1.3 Nichtangreifbarkeit/Immutability

Viele Faktoren tragen zur Nichtangreifbarkeit und Unveränderlichkeit (im weiteren Verlauf nur noch als Sicherheit bezeichnet) der Blockchain bei. Da alle Nodes die ausgeführten Transaktionen auf Validität prüfen, können diese nicht ohne Berechtigung, im Namen einer anderen Identität, oder mit unzureichenden Konditionen ausgeführt werden. Der wichtigste Faktor ist jedoch der genutzte Konsensmechanismus in Verbindung mit den verketteten Blöcken. Durch ihm wird sichergestellt, dass bestehende Daten nicht gelöscht oder manipuliert werden können.

Ein Beispiel dafür kann am PoW gezeigt werden. Ein Angreifer probiert eine Transaktion aus einen bestehenden Block zu entfernen. Dazu würde er die Transaktion bei seiner lokalen Blockchain entfernen. Nun ist jedoch der Hash des Blockes sowie der Block selber nicht valide und würde von keiner Node akzeptiert werden. Der Angreifer muss also erneut einen PoW für den manipulierten Block erbringen. Dies wäre für eine Einzelperson jedoch zeitaufwändig. Wenn der manipulierte Block nun noch Nachfolger hat, muss aufgrund des neuen Hashes auch für diese der PoW erbracht werden. Hinzu kommt, dass die Blockchain des Angreifers erst von allen Nodes akzeptiert wird, wenn sie länger ist. Er müsste also schneller als das gesamte Bitcoin-Netzwerk Blöcke erschaffen können. Dies ist nur möglich, wenn er 51% der Rechenleistung des Netzwerks besitzt. Deshalb wird dieser Angriff auch 51%-Angriff genannt [20] [6].

An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass auch wenn ein 51%-Angriff erfolgt, die Angriffsmöglichkeiten beschränkt sind. Der Angreifer kann keine unvaliden Transaktionen sowie Blöcke erstellen. Ihm ist es möglich DoS-Angriffe auszuführen, indem er verhindert das bestimmte Transaktionen in Blöcke aufgenommen werden. Ebenso kann er die Historie der Daten verändern, indem er eine Transaktion aus einem Block entfernt. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass die Transaktion zurück in den Transaktionspool geht. Es muss also jeden weiteren Block erstellen, um zu verhindern dass die Transaktion nicht erneut in einen Block aufgenommen wird, oder dafür sorgen, dass sie ungültig wird. Im Falle von Kryptowährungen wird ein solcher Angriff Double-Spend-Angriff genannt: Ein Angreifer sendet z.B. Bitcoins an einen Händler. Dieser wartet auf die Bestätigung der Transaktion in einen Block sowie auf nachfolgende Blöcke. So stellt er sicher, dass die Transaktion nicht in einem eventuell verworfenen Fork stand. Erst dann versendet er die Ware. Anschließend ersetzt der Angreifer die Transaktion durch eine Zahlung an sich selber und erstellt die längere Blockchain, womit der Händler letztendlich kein Geld erhalten hat [6]. Auch zu bedenken ist, dass ein Nutzer mit 51% der Rechenleistung wenig Motivation hat Angriffe auszuführen, da er für jeden erstellten Block Kryptowährung als Belohnung erhält. Der Wert der Kryptowährung würde sinken, wenn Angriffe auf die Blockchain entdeckt werden. Deshalb besteht für die sogenannten Miner eine Motivation, ehrlich zu arbeiten [4].

Der eben genannte Double-Spend-Angriff kann auf verschiedene Arten durchgeführt werden.

So könnte ein Angreifer eine Ware mit Bitcoins bezahlen, und diese sofort erhalten. Bevor seine Transaktion jedoch in einen Block besteht, transferiert er die gleichen Bitcoins an sein anderes Konto. Wenn diese beiden Transaktionen letztendlich in einen Block aufgenommen werden sollen, wird eine der Transaktionen ungültig sein, womit der Verkäufer eventuell keine Zahlung erhält [4].

2.1.2 Blockchaintypen

Es gibt drei Typen von Blockchains, welche die zugelassenen Teilnehmer bestimmen. Bisher wurden nur Public Blockchain-Anwendungen, wie Bitcoin und Ethereum erwähnt. In diesen gibt es keine Teilnehmerbeschränkungen, jeder kann am Netzwerk teilnehmen und die Blockchain öffentlich einsehen. Anders ist dies bei Permissioned (oder auch Consortium [21]) und Private Blockchains. Die beiden Begriffe werden in einigen wissenschaftlichen Arbeiten gleichgesetzt (siehe [22], [23], [24]). Hier folgt jedoch eine Unterscheidung. Dabei ist eine Private Blockchain, eine Blockchain welche nur von einem Nutzer verwendet wird. Da eine solche Anwendung keinen Sinn macht, da keine Vorteile der Blockchain genutzt werden können, wird darauf nicht genauer eingegangen. Interessanter sind Permissioned Blockchains, an welchen nur zugelassene Nutzer teilnehmen dürfen. Nur diese sind berechtigt, Transaktionen auszuführen und die Daten einzusehen [24]. Dies bietet sich vor allem bei B2B-Anwendungen an, welche von verschiedenen Unternehmen genutzt werden sollen. In diesen kann es aufgrund von z.B. sensiblen Daten nötig sein, dass nur bestimmte Parteien Zugriff auf die Blockchain haben. Tabelle 2.1 vergleicht die Blockchaintypen untereinander sowie mit einer zentralen Datenbank.

	Public BC	Permissioned BC	Zentrale DB
Transaktionsdurchsatz	Gering	Hoch	Sehr hoch
Nicht vertrauenswürdige Nodes	Viele	Wenige	Keine
Konsensmechanismus	Hauptsächlich PoW	BFT-Protokolle	Keiner
Zentral verwaltet	Nein	Teilweise	Ja

Tabelle 2.1: Vergleich der Blockchaintypen mit Datenbanksystemen. Die erwähnten BFT-Protokolle werden genauer im Kapitel 4.2 erläutert [2][7].

2.1.3 Exemplarische Anwendungsfälle

Die Blockchain wird als revolutionäre Technologie angepriesen (siehe [25]). Trotzdem ist es wichtig zu wissen, für welche Zwecke sie wirklich geeignet ist. Grundsätzlich macht eine Blockchain Sinn, wenn mehrere Parteien, welche sich nicht vertrauen, mit einem System interagieren wollen, welches von keiner dritten zentralen Instanz verwaltet wird [2]. Um eine bessere Vorstellung zu solchen Anwendungen zu erhalten, werden im Folgenden verschiedene Exemplarische Anwendungsfälle genannt und beschrieben.

Der erste Anwendungsfall, mit welchen die Blockchain-Technologie auch entstanden ist, sind Kryptowährungen. Mit Ihnen ist es möglich Geld zwischen beliebigen Parteien zu übertragen, ohne dass die Transaktionen von einer eventuell nicht vertrauenswürdigen Bank oder ähnlichem kontrolliert und verwaltet werden [20].

Weitere Anwendungsfälle ergeben sich mit der Möglichkeit Programmlogik auf der Blockchain abzubilden. So können beispielsweise dezentrale Online-Wahlen realisiert werden. Die Stimmen würden in der Blockchain gesammelt werden, und können so letztendlich nicht mehr von z.B. einer korrupten Regierung manipuliert werden [26].

Ein weiterer Anwendungsfall, insbesondere für den B2B-Bereich, wäre Supply Chain Management. Über eine digitale Lieferkette sollen Material- und Informationsflüsse zu Produkten und Dienstleistungen aufgebaut und verwaltet werden [27]. Dies erlaubt Unternehmen das automatisieren von Prozessen und das verbesserte reagieren auf Ereignisse (z.B. Lieferverspätungen). Weiterhin ist es dem Unternehmen möglich, dem Kunden exakt aufzuzeigen wo es und seine Unterprodukte produziert wurden. In klassischen B2B-Anwendungen müsste jedes Unternehmen, welches ein Teil der Supply Chain ist, die relevanten Daten durch z.B. APIs⁶ bereitzustellen. Dies bedeutet Aufwand, da diese erstmal entwickelt werden müssen. Weiterhin müssten Systeme von all diesen unterschiedlichen Schnittstellen die Daten abfragen und zusammenführen um die Supply Chain zu erstellen. Aufgrund dieses Aufwandes werden oft Dritte eingestellt, welche sich um den Aufbau und um die Datenintegration der Supply Chain kümmern. Den Aufwand, sowie die eventuell nicht vertrauenswürdige dritte Partei könnte man durch die Nutzung der Blockchain überspringen. In dieser könnte jedes Unternehmen die relevanten Daten an einer Stelle speichern. Die Supply Chain wäre direkt in der Blockchain vorhanden, und kein Unternehmen muss Datenmanipulation oder ähnliches befürchten [1].

Auch dezentrale Märkte sind für B2B-Anwendungen interessant. Der zentrale Marktplattformbetreiber, wie z.B. Ebay oder Amazon, welcher persönliche Informationen speichert und Gebühren für den Verkauf von Artikeln verlangt, wäre hinfällig. Nutzer könnten Waren untereinander verkaufen, während die Blockchain als Notar für den Warenaustausch dient [21].

Ein weiteres Beispiel wären Blockchain Sharing-Systeme. So könnte ein dezentrales Fahrradleihsystem aufgebaut werden. Nutzer würden mit ihrem Smartphone, über ihre in der Blockchain hinterlegte Identität (im Falle von z.B. Ethereum die Wallet-Adresse⁷), das Fahrrad entsperren. Dieser erkennt automatisch die gefahrene Distanz sowie die Nutzungsdauer. Über einen Smart Contract würde anschließend die automatische Zahlung erfolgen. Neben der Automatisierung besteht der Vorteil, dass mehrere Unternehmen oder auch Privatpersonen Leihfahrräder anbieten können, ohne dass sie einer zentralen Instanz mit der Verwaltung vertrauen müssen [29], [30].

⁶API: Schnittstelle für Anwendungsprogrammierung[28]

⁷Wallet: Speichert z.B. bei Ethereum und Bitcoin den Private Key des Nutzers und wird z.B. als Adresse für Zahlungen genutzt [4].

2.2 Anforderungen an B2B-Anwendungen

Für den zu entwickelnden Prototypen ergeben sich verschiedene Anforderungen, welche allgemein für B2B-(Blockchain)-Anwendungen gelten. Es ist wichtig diese zu kennen, um die Blockchain-Technologie in Bezug auf diese zu evaluieren.

Identitätsverwaltung Eine B2B-Anwendung besteht zwischen verschiedenen Unternehmen. Die Identität dieser muss bekannt sein, um die Teilnahmeerlaubnis zu erteilen und Berechtigungen zu verwalten. Die Identitäten sind ebenfalls in einer Blockchain von Bedeutung, um ausgeführte Transaktionen den Teilnehmern zuordnen zu können. Die für den Prototypen genutzte Blockchain-Implementierung muss also das registrieren und identifizieren von Teilnehmern unterstützen.

Berechtungsverwaltung Die verschiedenen Teilnehmer haben unterschiedliche Rechte was das Lesen, Erstellen und Verändern von Daten betrifft. So ist es z.B. wichtig, dass ein Teilnehmer nur seine eigenen, in der Blockchain registrierten Assets⁸ verändern kann.

Private Transaktionen Bei Blockchains wie Bitcoin und Ethereum sind alle Daten in der Blockchain für alle Teilnehmer einsichtbar. Aufgrund von sensiblen Daten kann es allerdings vorkommen, das nicht alle Transaktionen für alle Teilnehmer sichtbar sein sollen. So sollen z.B. Preisabsprachen nur von den relevanten Unternehmen eingesehen werden können.

Skalierbarkeit und Performance In Bitcoin ist lediglich ein Transaktionsdurchsatz von 7 Transaktionen pro Sekunde möglich [7]. Hinzu kommt, dass es ca. zwischen 30 Minuten und 16 Stunden dauern kann, bis eine Transaktion bestätigt ist [31]. Darauf wird auch genauer im Kapitel 4.1 eingegangen. In B2B-Anwendungen kann die Performance und Skalierbarkeit von großer Bedeutung sein. Je nach Art der Anwendung und Anzahl der Teilnehmer muss ein höherer Transaktionsdurchsatz als bei Bitcoin erzielt werden. Die Skalierbarkeit ist vor allem bei den Einsatz von IoT-Geräten von Bedeutung, welche untereinander kommunizieren und Transaktionen ausführen. Gartner behauptet, dass es bis 2020 ca. 7,2 Billionen vernetzte Geräte im Business-Sektor geben wird [32].

Sicherheit Die Sicherheit wird durch die genutzte Konsensmechanik realisiert. Der am häufigsten genutzte PoW ist in einem Netzwerk mit wenig Teilnehmern allerdings unsicher, da es einfach ist 51% der Rechenleistung zu erreichen. Weiterhin führt er zu einem hohen Stromverbrauch (Im Bitcoin-Netzwerk der Verbrauch von ca. 3.500.000 US-Haushalten [33]), welcher nicht erwünscht ist. Ebenfalls beeinflusst der PoW massiv die Performance (siehe Kapitel 4).

⁸Assets: Besitz/Eigentum

Kapitel 3

Aktueller Stand der Technik

Die Blockchain-Technologie ist im Jahr 2008 entstanden. Jedoch befindet sie sich erst seit ca. 2016 in einem Hype, wie die Gartner Hype Cycle von 2016 und 2017 [34][35] sowie die Google Trends zum Suchinteresse [36] zeigen. Aufgrund des Hypes entstehen viele Ideen zu der möglichen Anwendung der Blockchain, darunter auch viele unnütze [2]. Im Gartner Hype Cycle ist dies die “Peak of Inflated Expectations”. Es bestehen unrealistische Erwartungen an die Technologie, und die Anwendungszwecke sind noch nicht klar.

Es finden sich wenig Blockchain-Anwendungen, welche bereits in Produktionsumgebungen eingesetzt werden. Dies liegt u.a. auch daran, dass es sich um eine relativ junge Technologie handelt. Viele Blockchain-Implementationen werden nur für Kryptowährungen eingesetzt. Dazu gehören z.B. Bitcoin, Monero, Dashcoin oder Litecoin [37]. Erst mit Ethereum wird das Konzept von Smart Contracts erfolgreich implementiert, womit es möglich ist eigene Programmlogik in der Ethereum-Blockchain abzubilden und so dezentrale Anwendungen zu entwickeln. So nutzt beispielsweise AXA diese für Flugversicherungen. Kommt es zu einer bestimmten Verspätung eines Fluges löst ein Smart Contract automatisch die Auszahlung an den Kunden aus [38]. Während es viele Ideen für dezentralisierte Anwendungen gibt, handelt es sich bei vielen nur um Prototypen.

Ein weiteres Problem an jungen Technologien ist, dass die Limitationen noch nicht komplett evaluiert und gelöst sind. Dies führt dazu, dass die Blockchain für bestimmte Anwendungen (noch) nicht geeignet ist. Die Probleme werden in diversen wissenschaftlichen Arbeiten analysiert und es werden Lösungen für diese vorgeschlagen (siehe [7], [20] und [39]). Teilweise handelt es sich jedoch nur um Vorschläge, welche sich noch nicht im Einsatz befinden. Kapitel 4 beschäftigt sich genauer mit den Problemen, welche die Blockchain mit sich bringt.

Für Permissioned Blockchains haben sich verschiedene Plattformen herausgebildet. So gibt es Multichain, Quorum, Hyperledger Fabric oder Hyperledger Burrow [21]. Diese sollen die Probleme der öffentlichen Blockchains lösen. Aber auch hier gilt es die Implementationen genauer zu analysieren, um eine Aussage über ihren Nutzen zu treffen. So setzen sich Arbeiten von [21][24], [23] und [40] u.a. mit der Skalierbarkeit und Performance der Permissioned Blockchains auseinander.

Dezentrale Märkte sind eine der am meisten mit Blockchain in Verbindung erwähnten Use-Cases, wie man an Quellen wie [21] und [41] sehen kann. Neben Konzepten für diese (siehe [**KaiserDecentralizedPrivateMarketplace**]), gibt es auch Live-Systeme, wie Syscoin [42].

Dezentrale Wartungsmärkte hingegen werden nur in Verbindung mit der Supply Chain erwähnt, wie zum Beispiel in [43] oder [44]. Implementationen oder Konzeptentwürfe konnten nicht gefunden werden.

Kapitel 4

Evaluierung Permissioned Blockchains für B2B

Die Blockchain-Technologie bringt diverse Probleme mit sich, welche je nach Anwendungszweck und Blockchaintyp verschieden große Auswirkungen haben. Für den B2B-Bereich gilt es vor allem die Skalierbarkeit sowie die Konsensmechanismen zu analysieren.

4.1 Skalierbarkeit

Das CAP-Theorem besagt, dass es in einem verteilten System nur möglich ist, zwei von den drei folgenden Eigenschaften zu erfüllen: Konsistenz, Verfügbarkeit und Ausfalltoleranz. Bezogen auf die Blockchain wären dies: Dezentralisierung, Skalierbarkeit und Nichtangreifbarkeit [39]. Im Zuge der Skalierbarkeit wird vor allem auf den Performance (Transaktionsdurchsatz), sowie die Anzahl von Nutzern eingegangen. Dazu erfolgt zunächst eine Analyse an aktuellen Public Blockchains, und letztendlich an Permissioned Blockchains. Als Referenzwerte werden die Transaktionsdurchsätze von Paypal und Visa genutzt. Die Ergebnisse werden ebenfalls auf das CAP-Theorem angewandt.

4.1.1 Public Blockchains

4.1.1.1 Bitcoin

Das Bitcoin-Netzwerk erreicht aktuell einen maximalen Transaktionsdurchsatz von 7 Transaktionen (unterschiedlich je nach Größe der Transaktionen, variiert zwischen ungefähr 0,5kb und 1,2kb [46]) pro Sekunde (TPS), bei einer Blockgröße von 1MB. Hingegen erreichen Paypal und Visa zu Spitzenzeiten 115 TPS und 2000 TPS (siehe auch Abb. 4.1) [45]. Hinzu kommt, dass ungefähr 170000 unbestätigte Transaktionen¹ bestehen [47]. Berechnungen von Scherer zeigen, dass bei 11,8 Millionen Nutzern im Bitcoin-Netzwerk, sowie einem Transaktionsdurchsatz von 4 TPS, jeder Nutzer nur ca. 10 Transaktionen im Jahr senden kann [39].

¹Unbestätigte Transaktion: Eine Transaktion, welche noch nicht in einen Block vorkommt [4].

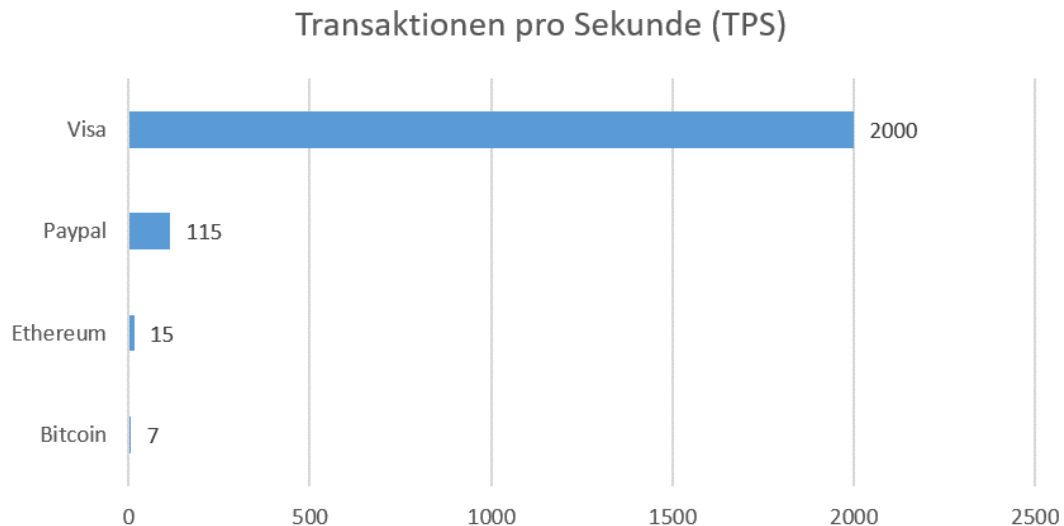


Abbildung 4.1: Möglicher Transaktionsdurchsatz bei Bitcoin, Ethereum, Paypal und Visa [45].

Der Transaktionsdurchsatz ist durch verschiedene Faktoren limitiert. Hauptsächlich durch die limitierte Blockgröße von 1MB, und dem PoW: Nur eine bestimmte Anzahl an Transaktionen passt in einen Block, und nur alle 10 Minuten wird einer erstellt. Es gäbe also die Möglichkeit, die Blockgröße zu vergrößern, oder die Zeit für den PoW zu verringern, indem die Schwierigkeit angepasst wird. Es gibt jedoch diverse Nachteile, welche dadurch entstehen würden. Bei einer größeren Blockgröße würde es länger dauern, bis ein Block beim Propagieren durch das Netzwerk alle Nodes erreicht. Dies würde zu öfter vorkommenden und längeren Forks führen und somit die Sicherheit des Netzwerks beeinträchtigen. Den gleichen Effekt hätte eine kürzere PoW Zeit, da die Wahrscheinlichkeit höher ist, dass zwei Nodes zur ungefähr gleichen Zeit einen Block erstellen [39] [6] [48].

Entsteht ein Fork, probieren Nodes die längere und somit gültige Blockchain zu erschaffen. Gelingt dies, wird die kürzere Blockchain mit den nun sogenannten Stale Blocks verworfen. Die gesamte Rechenleistung, welche in die Stale Blocks und seine Nachfolger geflossen ist, trägt nicht zur Sicherheit des Netzwerks bei. Dies lässt sich auch anhand der Abbildung 4.2 erläutern. Innerhalb der Blockchain bestehen durch mehrere Forks 5 Branches. Das bedeutet, dass die Rechenleistung des Netzwerks auf diese aufgespalten ist. Es wird davon ausgegangen, dass 20% der Rechenleistung in den obersten Branch geflossen ist, welcher der längste ist. Die restlichen 4 Branches erhalten je 10% der Rechenleistung. Wenn es nun einen Angreifer mit 40% der Rechenleistung probiert eine eigene Blockchain zu erstellen, gelingt ihm dies, da er schneller die längere Blockchain erstellen kann [48]. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein Angreifer nicht 51% der Rechenleistung für einen Fork benötigt, wenn das Netzwerk diese bei Forks verschwendet [49].

Ein weiteres Problem der Forks ist, dass Miner keine Belohnung für die Arbeit an verworfenen Blöcken erhalten. Dadurch kann es zur Zentralisierung durch wachsende Mining Pools kommen. Dies wird an folgenden Beispiel ersichtlich: Ein Mining Pool A besitzt 30% der Re-

chenleistung, ein Mining Pool B 10%. In dem genannten Beispiel würde Mining Pool A in 70% aller Fälle einen Stale Block erzeugen, und B in 90% aller Fälle. Kein Miner würde dem Mining Pool B beitreten, da die Wahrscheinlichkeit geringer ist, dass B gültige Blöcke erschafft. A hingegen würde immer mehr Miner, und somit mehr Rechenleistung erhalten [6].

An dieser Stelle sollte auch darauf hingewiesen werden, dass schnellere Blockerstellungzeiten nicht zwingend zu schnelleren Transaktionsbetätigungen führen. Transaktionen werden zwar schneller in Blöcken aufgenommen, aber es muss auf mehr Nachfolger gewartet werden, um sicher zu gehen, dass die Transaktion nicht in einem Fork vorkommt [39].

4.1.2 Ethereum

Bessere Skalierbarkeit durch GHOST Das Ethereum Netzwerk nutzt das sogenannte GHOST-Protokoll, und erreicht damit eine Transaktionsdurchsatz von 15 TPS, bei einer durchschnittlichen Zeit von 15 Sekunden um den PoW zu erbringen. Dieses löst Probleme des Forkings und der Benachteiligung von Minern. Ersteres wird dadurch gelöst, dass Stale Blocks in die Berechnung der gültigen Blockchain einfließen. Anders als bei Bitcoin, wo lediglich die Parents und deren Nachfolger eine Rolle spielen. Die Stale Blocks werden in Ethereum “Uncles” genannt. Kurz gesagt, ist ein Uncle ein alternativer gefundener Block welcher auf der gleichen Höhe wie der Parent bestehen würde [6].

Die Bestimmung der gültigen Blockchain wird an der Abbildung 4.2 ersichtlich. In Ethereum ist die Blockchain die gültige, für welche die meiste Arbeit aufgebracht wurde, unter Einbezug der Uncles. Das führt dazu, dass der Branch mit den meisten Uncles bestehen bleibt. Das bedeutet letztendlich, dass die gesamte Rechenleistung das Netzwerk absichert, auch wenn diese sich auf die Branches aufteilt. Ein Angreifer braucht somit weiterhin 51% der Rechenleistung um einen Angriff auszuführen [48].

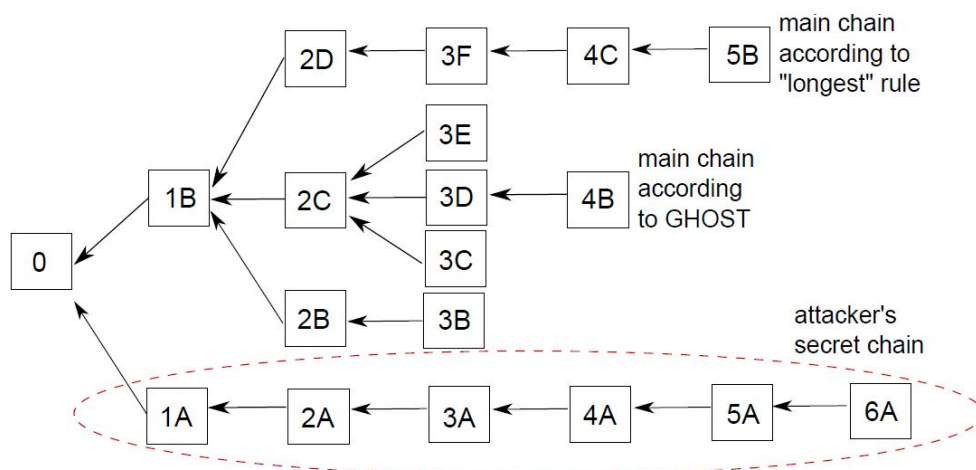


Abbildung 4.2: Auswahl der gültigen Blockchain. Bei Bitcoin die längere. Bei Ethereum die mit der meisten erbrachten Arbeit, unter Einberechnung der Uncle-Blocks [48].

Damit ist allerdings noch nicht das Problem der Zentralisierung durch Mining Pools gelöst.

Es besteht weiterhin keine Motivation für Miner, Uncles zu minen. Deswegen ist das GHOST-Protokoll in Ethereum so erweitert, dass Miner Ether² als Belohnung für das Erstellen von Uncles erhalten (allerdings weniger als bei vollwertigen Blöcken). Somit besteht ebenfalls die Motivation, kleineren Mining Pools beizutreten [6]. An dieser Stelle sollte auch erwähnt werden, dass Miner entscheiden können, an welchen Branch sie arbeiten [7].

Während Ethereum die Probleme löst, welche durch Forks entstehen, ist der Transaktionsdurchsatz trotzdem limitiert. Die Blockgröße muss klein genug bleiben, damit das Propagieren im Netzwerk effizient bleibt [39]. Ansonsten würden Miner unter Umständen so benachteiligt werden, dass sie nur sehr selten bis garnicht den aktuellen Block der gültigen Blockchain erhalten würden. Dies wiederum würde dazu führen, dass sie nur Uncles minen können, und so nie die volle Belohnung erhalten können. Hinzu kommt, dass Uncles nur gültig sind, wenn sie maximal eine bestimmte Anzahl an Generationen vom aktuellen Block in der gültigen Chain entfernt sind. Ansonsten hätten die Miner auch weniger Motivation ehrlich zu bleiben, da sie ohne Nachteile an der Chain eines Angreifers arbeiten könnten [6].

Schlechtere Skalierbarkeit durch Smart Contracts Ethereum löst die Probleme von häufig auftretenden Forks und erlaubt so einen höheren Transaktionsdurchsatz sowie schnellere Transaktionsbestätigungszeiten. Weitere Probleme entstehen jedoch, wenn eine Blockchain nicht nur Geldtransfertransaktionen verarbeitet. Ethereum erlaubt das speichern und ausführen von eigenem Code durch Smart Contracts. Dadurch steigt die Komplexität der auszuführenden Transaktionen. Dadurch nimmt die Performance ab, da die entstehenden größeren Blöcke eine längere Propagationszeit verursachen. Ebenfalls verschlechtert sich die Performance des Netzwerks, da die Daten schwieriger zu verarbeiten sind. So muss jede Node alle Transaktionen verifizieren, Smart Contract-Code ausführen, und die Ergebnisse speichern. [39].

In Ethereum werden Transaktionen sequentiell bei allen Nodes ausgeführt. Dazu gehört das ausführen von Smart Contract-Code sowie das verifizieren der Ergebnisse. Nur so können in Konflikt stehende Transaktionen, wie zum Beispiel beim Double-Spend) erkannt werden. Eine Parallelausführung ist nicht möglich. Dies verschlechtert letztendlich die Performance des Netzwerks, da es länger dauert Transaktionen auszuführen [39]. Dies wird auch durch ein Beispiel klar. Ein Angreifer kann DoS-Attacken ausführen, indem er komplex auszuführende Smart Contracts schreiben. Die Ausführung von diesem bei jeder Node führt dazu, dass keine anderen Operationen ausgeführt werden können. Ethereum löst dieses Problem, indem der Transaktionssender für jeden Berechnungsschritt eine Gebühr zahlen muss. Dies funktioniert jedoch nur, wenn in der Blockchain-Anwendung eine Kryptowährung genutzt wird [40].

Ebenfalls behauptet Vukolic, dass der Code der Smart Contracts nicht bei allen Nodes ausgeführt werden muss. Um Konsens zu erreichen genügt es, dass alle Nodes den gleichen Stand der Daten erhalten. Deshalb könnte die Codeausführung von nur von bestimmten Nodes ausgeführt werden. Das Problem dabei ist, dass man eine genügend große Anzahl an vertrauens-

²Kryptowährung von Ethereum [6].

würdige Teilnehmer festlegen muss [40]. Damit geht allerdings auch das vertrauenslose Modell der Blockchain verloren.

Letztendlich lässt sich sagen, dass Public Blockchains nicht skalieren. Um dies zu lösen, müssen schnellere Blockpropagationszeiten, geringere Transaktionsgrößen und/oder bessere Transaktionsverarbeitung realisiert werden [39]. Weitere Schwierigkeiten bestehen sobald nicht nur Geldtransferaktionen verarbeitet werden müssen. Betrachtet man das CAP-Theorem wird ersichtlich, dass nur die Eigenschaften Dezentralisierung und Sicherheit gegeben sind. Es ist jedoch zu bedenken, dass viele Probleme der Skalierbarkeit aufgrund der genutzten Konsensmechanik bestehen. Auch wenn es teilweise Lösungsvorschläge für diese gibt, genügen sie bisher nicht um Skalierbarkeit herzustellen. Deshalb gilt es, die Limitationen von Permissioned Blockchains sowie alternative Konsensmechaniken für diese zu analysieren.

4.1.3 Permissioned Blockchains

Permissioned Blockchains werden eingesetzt, wenn nur bestimmte Teilnehmer an der Blockchain teilnehmen sollen. So gibt es z.B. auch eine verwaltende Instanz, welche u.a. die ersten berechtigten Teilnehmer bestimmt und die Netzwerkkonfiguration vornimmt. Dadurch entsteht eine stärkere Zentralisierung als bei Public Blockchains. Bezieht man sich auf das CAP-Theorem, müssten sich dadurch die Sicherheit und/oder Skalierbarkeit verbessern. Dies führt allerdings auch dazu, dass ein größeres Maß an Vertrauen zwischen den Teilnehmern gegeben sein muss. Dies wird dadurch sichergestellt, dass jeder Teilnehmer die Rechte zur Teilnahme am Netzwerk erhalten hat und die Identitäten dieser bekannt sind. Durch letzteres ist nachverfolgbar, welche Teilnehmer welche Transaktionen ausführen [39].

Scherer behauptet, dass das größere Vertrauen es erlaubt den Nodes verschiedene Aufgaben zuzuteilen. Dies beschreibt er am Beispiel von Hyperledger Fabric, einer Permissioned-Blockchain. In dieser gibt es Peer und Ordering Nodes. Erstere simulieren das ausführen von der Transaktionen und der damit verbundenen Datenänderungen. Letztere bestimmen die Reihenfolge der auszuführenden Transaktionen in den Blöcken. Peer Nodes führen die bereits simulierten Transaktionen nacheinander aus und erkennen Konflikte in den Transaktionen (genauer im Kapitel 5.2 erklärt). Die Ordering Nodes sind also letztendlich für den Konsens verantwortlich. In Gegensatz zu Ethereum können Peer Nodes so parallel Transaktionen verarbeiten. Sie müssen sich nicht um eventuelle Konflikte oder die Reihenfolge der Transaktionen kümmern. Letztendlich würde die Skalierbarkeit, von der Hardware der Peers und der Anzahl dieser abhängen.

Scherer führt ebenfalls Tests durch um die Performance von Hyperledger Fabric zu analysieren. Dazu nutzt er eine frühe und instabile Version 1.0. Das Netzwerk besteht aus einer Ordering und einer Peer Node. Es wird kein Konsensmechanismus genutzt. Die Anwendung selber unterstützt die Zahlung mittels digitaler Assets (z.B. Tokens bzw. Coins) zwischen zwei Accounts. Dabei erreicht er einen maximalen Transaktionsdurchsatz von 350 TPS. Dabei ist allerdings zu bedenken, dass der Test auf einer Maschine mit limitierten Ressourcen ausgeführt

wird. Um einen maximalen Transaktionsdurchsatz zu erreichen, müssten mehrere leistungsstarke Computer für den Test eingesetzt werden. Scherer stellt ebenfalls fest, dass der Transaktionsdurchsatz abnimmt, desto mehr Peers es gibt, welche Transaktionen bestätigen. Dies liegt daran, dass diese sogenannten Endorser untereinander kommunizieren müssen. Pro Node müssten $O(n^2)$ Nachrichten gesendet werden, wobei n die Anzahl an Nodes ist. Die Anzahl an effizient nutzbaren Endorsern ist also beschränkt. So führt der Test mit einem Endorser zu einem Transaktionsdurchsatz von ca. 70 TPS, während mit 14 Endorsern nur noch ca. 15 TPS erreicht werden. Somit wäre die Anzahl an effizient nutzbaren Endorsern begrenzt. Scherer behauptet jedoch, dass Fabric mit rechenstarken Maschinen in der Theorie tausende TPS unterstützt [39].

Ein Paper von Pongnumkul u. a. vergleicht die Leistung von Hyperledger Fabric mit Ethereum. Er nutzt dazu die stabile Version 0.6. Er führt die Test ebenfalls mit nur einer Peer Node durch. Zur Ordering Node macht er keine Angabe. Die Anwendung ist die gleiche wie bei Scherer und es wird ebenfalls kein Konsensmechanismus genutzt. Pongnumkul stellt fest, dass die Performance von Fabric in allen Kriterien besser ist als bei Ethereum. So betrug die Zeit, bis eine Beispieltransaktion verarbeitet wurde bei Ethereum 41 Sekunden und bei Ethereum 478 Sekunden. Tests zum maximalen Transaktionsdurchsatz haben ergeben, dass Ethereum 40 TPS und Hyperledger Fabric 300 TPS erreicht hat. Die dazugehörige Abbildung 4.3 zeigt auch, dass die Unterschiede zwischen Ethereum und Fabric signifikanter sind, desto mehr Transaktionen verarbeitet werden müssen [23].

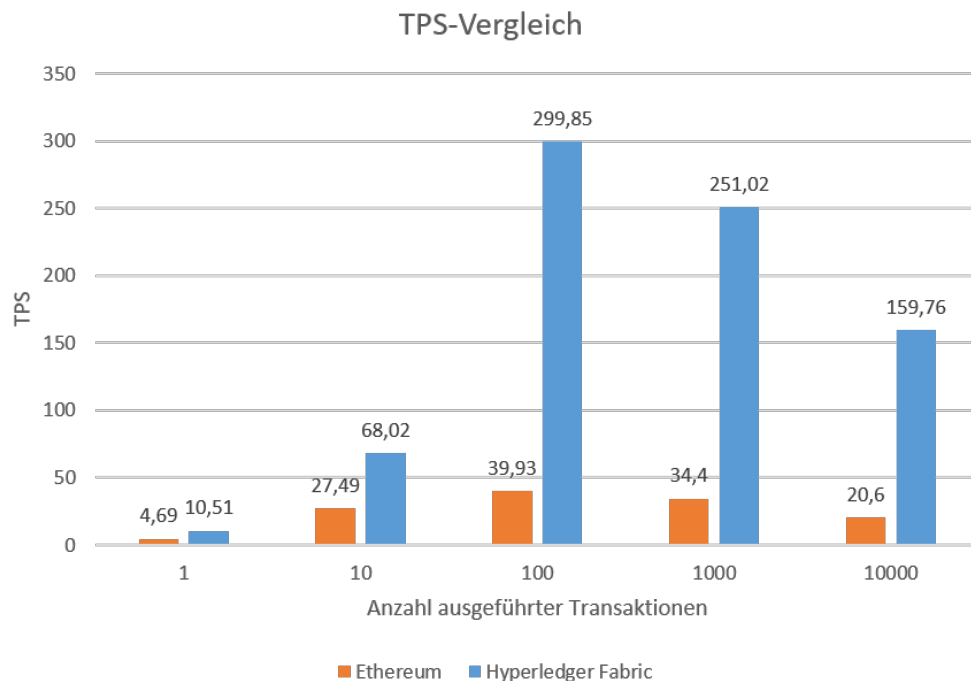


Abbildung 4.3: Vergleich des Transaktionsdurchsatzes von Ethereum und Hyperledger Fabric [23].

Bei beiden Tests ist zu bedenken, dass sie mit nicht aktuellen Versionen von Hyperledger Fabric ausgeführt wurden. Mittlerweile gibt es eine stabile Version 1.0, sowie eine Preview von

Version 1.1.0 [50]. Es ist also möglich, dass die Performance sich mittlerweile verbessert hat.

Letztendlich lässt sich sagen, dass Permissioned Blockchains, was die Verarbeitung von Transaktionen betrifft, eine bessere Performance erzielen. Damit bestätigt sich auch das CAP-Theorem bezüglich der Skalierbarkeit. Die Performance wurde allerdings noch nicht unter der Nutzung verschiedener Konsensmechanismen betrachtet. Weiterhin muss das CAP-Theorem noch auf die Sicherheit untersucht werden. Deshalb erfolgt im nächsten Kapitel die Analyse der Skalierbarkeit und Sicherheit von Konsensmechanismen.

4.2 Konsensmechanismen

Das Erreichen von Konsens in einer Blockchain, ist eine Abwandlung des Byzantine Generals Problem. In diesem gibt es Generäle, welche Armeen kommandieren, welche eine Stadt umzingeln. Ein Angriff auf diese ist nur erfolgreich, wenn alle Armeen gleichzeitig angreifen. Die Generäle müssen untereinander kommunizieren und Konsens darüber herstellen, ob ein Angriff erfolgen soll. Allerdings gibt es Verräter unter diesen. Es handelt sich also um ein vertrauensloses Umfeld. Genau so kann es in einer Blockchain zu den sogenannten Byzantine Faults kommen, wenn nicht vertrauenswürdige Nodes Daten manipulieren können. Deshalb müssen verteilte Systeme Byzantine Fault Tolerance (BFT) herstellen, um eine gewisse Anzahl an nicht vertrauenswürdigen Teilnehmern zu tolerieren. Dies geschieht in Blockchains über die Konsensmechanismen [7].

Eine Blockchain, welche den PoW als Konsensmechanismus nutzt, ist nicht skalierbar. Ebenfalls würde er in Netzwerken mit relativ wenig Teilnehmern die Sicherheit beeinträchtigen, da ein Teilnehmer einfacher 51% der Rechenleistung erreichen kann. Für Permissioned Blockchains muss also ein Konsensmechanismus gefunden werden, welcher Skalierbarkeit und Sicherheit herstellt. Aufgrund des höheren Vertrauens in Permissioned Blockchains, behauptet Scherer, dass ein Konsensmechanismus genutzt werden kann, welcher Vertrauen in geringerem Maße als der PoW garantiert. Somit könnten Skalierbarkeit und Sicherheit hergestellt werden [39]. Im folgenden werden verschiedene Konsensmechanismen verschiedener Blockchain-Technologien miteinander verglichen. Dabei ist zu bedenken, dass nur auf die Konsensmechanismen, welche Sicherheit und Skalierbarkeit in Permissioned Blockchains sicherstellen können, im Detail eingegangen wird.

4.2.1 Proof of Stake

Beim PoS hängt die Wahrscheinlichkeit, einen Block zu minen, von der Menge des Eigentums (z.B. Kryptowährung) eines Nutzers ab. Desto mehr Bitcoins man beispielsweise hat, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit für das Mining ausgewählt zu werden. Ähnlich wie beim PoW könnte ein Teilnehmer mit 51% aller Bitcoins das Netzwerk angreifen, da er die längere Blockchain erstellen kann. Aber selbst wenn es ein Teilnehmer schafft, 51% der Bitcoins zu besitzen, hätte er keine Motivation dazu. Denn letztendlich würde ein Angriff den Kurs von Bitcoin

senken, und somit würde der Miner sich selber schaden [7]. Da der PoS hauptsächlich nur bei Kryptowährungen genutzt werden kann, ist er für Permissioned Blockchains uninteressant.

4.2.2 Proof of Elapsed Time

Der PoET wird in Intels Blockchain-Technologie Hyperledger Sawtooth genutzt. Die grundlegende Idee ist, dass eine Node eine zufällige Zeit generiert, welche Sie warten muss um einen Block zu erstellen. Um sicherzustellen, dass die generierte Zeit nicht verfälscht wurde, wird Trusted Computing³ genutzt. So stellen Intels Software Guard Extensions (SGX) sicher, dass Code nicht modifiziert werden kann. Eine Node muss also über solchen unmodifizierbaren Code eine Zeit generieren. Weiterhin erfolgen statistische Tests, um zu verhindern dass eine Node Blöcke zu schnell und somit zu oft erstellt. Letztendlich ist die Blockerstellung damit fair verteilt, und kein Teilnehmer kann die Blockchain kontrollieren. Im Prinzip funktioniert der Mechanismus wie der PoW. Dort wird eine Wartezeit durch das Finden eines Hashes sichergestellt, während dies beim PoET durch die Hardware sichergestellt wird. Dadurch, dass es keine rechenintensiven Aufgaben gibt, ist die Skalierbarkeit sicher gestellt. Es ist jedoch zu bedenken, dass es bisher wenige Analysen zu der Sicherheit des PoET gibt. Ein Paper von Chen u. a. stellt fest, dass der Konsensmechanismus unter bestimmten Umständen unsicher ist, schlägt aber auch Lösungen dafür vor. Ebenfalls kommt hinzu, dass man der Hardware von Intel für das Trusted Computing vertrauen muss. [52].

4.2.3 Diversity Mining Consensus

Der Diversity Mining Consensus ist ähnlich dem PoW. In diesem ist der Block einer Node nur valide, wenn sie eine bestimmte Anzahl an vorherigen Blöcken nicht erstellt hat. Dies führt letztendlich dazu, dass eine Wartezeit für jede Node nicht durch das Finden eines Hashes (siehe PoW) oder durch eine generierte Zeit (siehe PoET) realisiert wird. Für den Mechanismus müssen alle Teilnehmer am Netzwerk bekannt sein. Auch hier kann es zu Forks kommen, wenn zwei Nodes zur ungefähr gleichen Zeit einen Block erstellen. Ebenfalls wird die entstehende längere Blockchain akzeptiert. Durch die Wartezeit wird sichergestellt, dass der Branch mit den meisten Minern die längere Blockchain erstellt. Die Gefahr bei diesen Konsensmechanismus ist, dass bösartige Miner sich zusammen tun können. Unter den richtigen Umständen erstellt der Zusammenschluss die meisten Blöcke, und kann somit auch bei Forks eine längere Blockchain erstellen, um so Double-Spend-Angriffe auszuführen. Die Skalierbarkeit ist aufgrund des fehlenden Rechenaufwands gegeben. [53][54].

4.2.4 QuorumChain

Quorum ist ein Fork von Ethereum für Permissioned Blockchains. Dieser nutzt den Konsensmechanismus QuorumChain. Es gibt Voter und Block-Maker Nodes. Die Block-Maker schlagen

³Trusted Computing: Hardware, welche sicher stellt, dass ein Computer sich wie erwartet verhält [51]

Blöcke zum erstellen vor, und die Voter stimmen für diese ab. Um Forks zu verhindern, warten die Block-Maker eine zufällige Zeit und erstellen den Block. Die Voter validieren diesen und stimmen für ihn ab, indem Sie u.a. die Transaktionen ausführen und überprüfen ob der vorherige Block genug Stimmen erhalten hat. Die Nodes hängen letztendlich den Block an ihre lokale Chain an, welcher einen bestimmten Schwellwert an Stimmen überschritten hat, oder im Falle eines Forks die meisten Stimmen erhalten hat. Die Sicherheit des Mechanismus ist fragwürdig. Schon allein mit einem böswärtigen Block-Maker würde es ständig zu Forks kommen, welche Double-Spend-Angriffe ermöglichen und die Zeit erhöhen bis eine Transaktion nicht mehr verworfen werden kann [54].

4.2.5 Practical Byzantine Fault Tolerance

Der PBFT gehört zu der Familie der BFT-Protokolle. Hier müssen ebenfalls alle Teilnehmer bekannt sein. Beim PBFT wählen die Teilnehmer eine Leader-Node. Jede Runde schlägt diese einen neuen Block mit auszuführenden Transaktionen vor. Dieser wird an alle anderen Nodes weitergeleitet. Anschließend wird der Konsens hergestellt. $\frac{2}{3}$ der Nodes müssen dem im Block enthaltenen Transaktionen zustimmen, damit er erstellt wird. Erst dann werden die Transaktionen bei jedem Teilnehmer ausgeführt. Deshalb können bis zu $\frac{1}{3}$ der Nodes un vertrauenswürdig sein. Ein Angreifer müsste für einen Angriff die Kontrolle über $\frac{2}{3}$ der Nodes haben [18][7].

Vukolic behauptet, dass es BFT-Protokolle gibt, welche einen Transaktionsdurchsatz von mehreren 10000 TPS unterstützen. Die Skalierbarkeit dieser bezüglich der Anzahl an Nodes ist jedoch begrenzt [55]. Croman erzielt bei seinen Tests mit dem PBFT, bei 8 Nodes und 8192 auszuführenden Transaktionen einen Transaktionsdurchsatz von 14000 TPS. Weiterhin wird ersichtlich wie die Performance mit der Anzahl an Nodes abnimmt. Mit 64 Nodes und 8192 auszuführenden Transaktionen wird ein Transaktionsdurchsatz von 4500 TPS erreicht [56]. Im Gegensatz zum PoW besteht hier eine bessere Skalierbarkeit bezüglich des Transaktionsdurchsatzes, allerdings ist sie bezüglich der Anzahl an Teilnehmern begrenzt [55].

Ein weiterer Vorteil von BFT-Protokollen ist, dass es Consensus Finality gibt. Das bedeutet, dass es nicht zu Forks kommen kann. Somit müssten Nutzer nicht darauf warten, dass mehrere Blöcke nach einer Transaktion erstellt werden, damit die Sicherheit gegeben ist, dass diese endgültig bestehen wird. Somit entfällt auch die Gefahr von Double-Spend-Attacks [55].

Die Angriffe, welche mit mehr als $\frac{1}{3}$ der Voting Power erfolgen können, sind die sogenannten Censorship Attacks. So könnten Nodes verhindern, dass neue Blöcke entstehen, indem sie ihre Stimme zurückhalten. Weiterhin könnten sie bestimmte Transaktionen zensieren, indem sie dafür stimmen diese nicht in einem Block aufzunehmen [57].

4.2.6 Tendermint

Tendermint ist eine Abwandlung des PBFT-Konsensmechanismus. Der größte Unterschied besteht darin, dass die Nodes, welche einen Block vorschlagen, in einem Round-Robin Verfahren ausgewählt werden. So gibt es in jeder Runde einen neuen Blockersteller. Hinzu kommt, dass die Teilnehmer mit ihren Coins, welche die Voting Power bestimmen, abstimmen. Die Coins werden für eine Vote für eine bestimmte Zeit an die Vote gebunden und damit für die weitere Nutzung gesperrt. Aufgrund der Asynchronität des Netzwerks kann es passieren, dass eine Node noch keine Information über einen bereits neu erstellten Block erhalten hat. Das führt dazu, dass er einen neuen Block auf der gleichen Höhe des bestehenden Blocks vorschlägt. Es kann dann zu einem Fork kommen, wenn beide Blöcke $\frac{2}{3}$ der Voting Power erhalten. Dies ist nur möglich, wenn mindestens $\frac{1}{3}$ der Voting Power böse genutzt werden. Diese Nodes können jedoch bestraft werden. Durch die an die Abstimmung gebundenen Coins, können Nodes, welche böse abgestimmt haben, bestraft werden. So werden die gebundenen Coins einfach zerstört [58][59]. Es ist zu bedenken, dass Tendermint-Konsensus nur mit einer Kryptowährung im vollen Umfang funktioniert.

4.2.7 Sonstige BFT-Konsensmechanismen

Neben den bisher erwähnten BFT-Konsensmechanismen, gibt es noch diverse andere, welche das Prinzip des PBFT mehr oder weniger abwandeln. So gibt es Symbiont und R3 Corda mit BFT-SMaRt, Iroha mit Sumeragi, Kadena mit ScalableBFT und Chain mit Federated Consensus [54]. Aufgrund der Vielfalt und Detailreichtum jeder dieser Konsensmechanismen, wird nicht genauer auf sie eingegangen. Es genügt die Prinzipien von BFT-Protokollen anhand des PBFT zu verstehen.

4.3 Sonstige Einschränkungen

4.3.1 Private Transaktionen

In Blockchains wie bei Bitcoin und Ethereum ist es nicht möglich, private Transaktionen auszuführen. Das bedeutet, alle Transaktionen sind für alle Teilnehmer sichtbar. In Permissioned Blockchains kann es Fälle geben, wo dies nicht erwünscht ist. So soll z.B. eine Preisabsprache zwischen 2 Teilnehmern in der Blockchain dokumentiert werden, welche für andere nicht sichtbar sein soll.

In Quorum wird dies so realisiert, dass in einer Transaktion angegeben wird, welche Teilnehmer die Transaktion sehen dürfen. Diese wird anschließend verschlüsselt, und kann nur von den angegebenen Teilnehmern entschlüsselt werden. Die Transaktion wird im Netzwerk verteilt, und nur von den Teilhabern ausgeführt [60].

In Hyperledger Fabric werden Private Transaktionen über Channels ermöglicht. Dabei ist jeder Channel eine eigene Blockchain, mit verschiedenen Teilnehmern. So würde es beispielsweise

se einen öffentlichen Channel geben, an welchen alle Teilnehmer der Permissioned Blockchain teilnehmen. Zusätzlich würde es private Channel geben, welche nur zwischen bestimmten Teilnehmern bestehen würden. Keine Daten können zwischen den Channels übertragen werden [39].

Der Konsens bei privaten Transaktionen stellt ein Problem dar. In Quorum sind Teile der Transaktion verschlüsselt, womit diese nicht von allen Nodes verifiziert werden können. Die Verifizierung ist jedoch trotzdem anhand anderer Daten möglich (siehe [QuorumChainConsensus2018]). In Hyperledger Fabric wird der Konsens über Ordering Nodes hergestellt. Teilnehmer eines Channels könnten bereits bestehende Ordering Nodes nutzen, womit diese allerdings die privaten Transaktionen erhalten. Ebenfalls könnten für den Channel neue Ordering nodes von jedem Teilnehmer erstellt werden. Mit 2 Teilnehmern wäre dies jedoch je nach genutzten Konsensmechanismus problematisch. Zu dem Konsens bei privaten Transaktionen in Hyperledger Fabric konnten keine Quellen gefunden werden.

4.3.2 Datenmenge

Ein noch nicht angesprochenes Problem der Blockchain ist die Datenredundanz im Bezug auf die Datenmenge. Da keine Daten in der Blockchain gelöscht werden können, wächst sie stetig an. So ist die Bitcoin-Blockchain im Moment 151GB groß [61]. Größere Datenmengen werden schneller erreicht, wenn nicht nur Geldtransferaktionen bestehen.

Die Datenmenge stellt ein Problem dar, da Teilnehmer ab einem bestimmten Punkt eventuell nicht mehr bereit sind die Blockchain auf ihrer Node zu speichern. Dies würde zu weniger Minern, und somit zu höherer Zentralisierung führen [39].

4.4 Fazit

Die Skalierbarkeit von Public Blockchains stellt ein Problem für Anwendungen dar. Die Performance ändert sich mit wachsender Nutzerzahl zwar nicht [39], ist aber trotzdem gering. In Permissioned Blockchains ist das Gegenteil der Fall. Es besteht eine relativ hohe Performance, welche jedoch mit der Anzahl an Peers abnimmt. Letztendlich ist unklar, ob Permissioned Blockchains einen zufriedenstellenden Transaktionsdurchsatz (verglichen mit Paypal und Visa) für B2B-Anwendungen erreichen. Tests von Scherer ergeben, dass dies nicht der Fall ist. Diese wurden jedoch in einer unzureichenden Testumgebung ausgeführt. Die theoretisch erreichbaren tausenden TPS würden auf einen ausreichenden Transaktionsdurchsatz hinweisen. Vergleiche mit Ethereum zeigen zumindest, dass Permissioned Blockchains performanter sind als Public Blockchains.

Die Performance der Konsensmechanismen ist ausreichend. In Permissioned Blockchains bieten sich vor allem diese an, welche auf BFT-Protokollen beruhen. Diese können je nach speziellen Protokoll Skalierbarkeit und Sicherheit herstellen. Es ist allerdings auch zu bedenken, dass sie weniger Sicherheit als beispielsweise der PoW garantieren. Somit kann letztendlich

auch eine Aussage zu den CAP-Theorem getroffen werden. Die geringere Dezentralisierung sowie Sicherheit sorgen für eine höhere Performance, und damit für bessere Skalierbarkeit.

Weiterhin zeigen Blockchain-Implementationen wie Hyperledger Fabric und Quorum, dass private Transaktionen realisiert werden können. Bezüglich dieser ist jedoch unklar, wie effizient der Konsens umgesetzt werden kann.

Kapitel 5

Umsetzung eines dezentralen Wartungsmarktes

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem letzten Kapitel, wird im Folgenden das Konzept des dezentralen Wartungsmarktes vorgestellt und umgesetzt.

5.1 Konzept und Anforderungen

Als Proof-of-Concept erfolgt die Entwicklung einer prototypischen B2B-Blockchain-Applikation in Form eines automatisierten sowie dezentralisierten Wartungsmarktes. Teilnehmer an diesem sind multiple Unternehmen und Wartungsanbieter. Erstere besitzen IoT-Geräte, welche erkennen können, dass sie eine Wartung benötigen. Die Wartungsanbieter erhalten die Informationen zur Wartung, und können sich für diese anmelden. Anschließend würden sie diese durchführen und dabei die Wartungsschritte loggen.

In klassischen B2B-Anwendungen wäre die Realisierung dieses Systems auf zwei Arten erfolgt. Bei ersterer gäbe es eine dritte Partei, welche den Markt verwaltet, und bei welcher sich alle Unternehmen und Wartungsanbieter anmelden müssen (z.B. Ebay). Die andere Möglichkeit wäre, dass eines der teilnehmenden Unternehmen den Markt verwaltet. Bei beiden Optionen müssten die Teilnehmer ihre Daten einer eventuell nicht vertrauenswürdigen zentralen Instanz zur Verfügung stellen.

Um dies zu verhindern, wird der Wartungsmarkt auf Basis der Blockchain-Technologie implementiert. Somit können beliebig viele Unternehmen und Wartungsanbieter an dem System teilnehmen, ohne dass eine Datenmanipulation durch die Teilnehmer oder eine zentrale Instanz befürchtet werden muss. Wartungen werden verfolgbar und unveränderbar dokumentiert, ohne dass Vertrauen zwischen den Parteien nötig ist.

Neben den im Kapitel 2.2 genannten allgemeinen Anforderungen an B2B-Blockchain-Anwendungen, ergeben sich speziellere für das zu entwickelnde System. Die Spezifizierung dieser ist wichtig, denn auf Basis dieser wird eine Blockchain-Implementation ausgewählt und auf verschiedene Probleme analysiert. Folgende Anforderungen ergeben sich für den dezentralen Wartungsmarkt:

Automatische Wartungsankündigung Wenn die IoT-Geräte Wartungsbedarf erkennen, kündigen sie dies in Form eines Smart Contracts in der Blockchain an. Es kann verschiedene Gründe für die Wartung geben. So kann z.B. ein Wartungsdatum erreicht werden, oder Sensorwerte weisen auf einen Fehler hin.

Konditionen für Vertragsannahme Wartungsanbieter können die Smart Contracts nur unter bestimmten Konditionen annehmen. So muss z.B. ein Wartungsanbieter bereits Erfahrungen mit der Wartung von bestimmten Geräten haben. Diese Information könnte ebenfalls aus der Blockchain abgefragt werden. Weiterhin darf der Vertrag z.B. noch nicht von einem anderen Anbieter akzeptiert worden sein.

Wartungs-Logging Die Wartungsanbieter melden sich am Gerät mit an, und loggen die durchgeführten Wartungsschritte. So entsteht eine nachverfolgbare und nicht löschbare Historie an durchgeführten Wartungen mit dazugehörigen Schritten.

Wartungsüberprüfung Die IoT-Geräte überprüfen, ob eine Wartung korrekt erfolgt ist, und schließen den dazugehörigen Wartungsvertrag. Die Überprüfung kann anhand der geloggen Schritte sowie Sensorwerten erfolgen, welche vor und nach der Wartung existiert haben.

An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass das System um viele nützliche Features erweiterbar ist. So könnte zum Beispiel eine Bewertung der Wartungsanbieter anhand bestimmter Faktoren erfolgen. Da es sich jedoch nur um eine prototypische Implementation handelt, werden nur die Features implementiert, welche für einen Proof-of-Concept eines solchen Systems benötigt werden.

5.2 Technologieauswahl

Aus den Anforderungen an den dezentralen Wartungsmarkt ergeben sich die folgenden Anforderungen an die zu nutzende Plattform:

- Möglichkeit Permissioned Blockchains zu erstellen
- Möglichkeit eigene Programmlogik zu implementieren (Smart Contracts)
- Höchstmögliche Performance (Transaktionsdurchsatz)
- Höchstmögliche Skalierbarkeit im Bezug auf die Anzahl der Teilnehmer
- Konsensmechanismus mit höchstmöglicher Sicherheit und Performance
- Private Transaktionen
- Mindestens Version 1
- Gute Dokumentation und Community Support

Zunächst einmal sind öffentliche Blockchain-Plattformen, wie Bitcoin, Ethereum und Sawtooth Lake aus der Auswahl entfallen. Daraufhin wurden die Permissioned Blockchains, aufgelistet in der Tabelle 5.1, miteinander verglichen. Multichain, OpenChain sowie Chain Core

konnten ausgeschlossen werden, da sie keine Smart Contracts unterstützen. Die Plattformen mit den höchsten Transaktionsdurchsatz sind Hyperledger Fabric und Hyperledger Burrow. Burrow befindet sich jedoch noch in einer frühen Version, womit es ebenfalls nicht zur Auswahl steht [50]. Letztendlich steht so nur noch Hyperledger Fabric zur Auswahl.

Version 1 ist bereits im Juli 2017 erschienen [50]. Fabric bietet eine umfassende Dokumentation, sowie Community Support über RocketChat und StackOverflow [62]. Private Transaktionen werden über Channels realisiert [39]. Ein großer Vorteil von Hyperledger Fabric gegenüber anderen Plattformen, sind austauschbare Konsensmechanismen. Dadurch, dass es keinen festgelegten Konsensmechanismus gibt, kann je nach Use-Case ein Konsensmechanismus ausgewählt werden, welcher die benötigte Performance, Skalierbarkeit und Sicherheit herstellt [40]. Dies ist vor allem wichtig im Prototyping. Wenn der Prototyp vom entstehenden dezentralen Wartungsmarkt erweitert werden soll (z.B. um mehr Teilnehmer), kann ein neuer Konsensmechanismus gewählt werden welcher den neuen Anforderungen entspricht. Vukolic nennt ebenfalls den Vorteil, dass Fabric eine bessere Performance als andere Plattformen erzielt, da die Nodes nach Peer und Ordering Nodes aufgeteilt werden. Aufgrund dieser Gründe behauptet Vukolic auch, dass Hyperledger Fabric die Limitationen anderer Permissioned Blockchains löst [40]. Somit ist letztendlich Hyperledger Fabric die verwendete Technologie für den dezentralen Wartungsmarkt.

Unternehmen	Technologie	Performance	Smart Contracts
Coin Sciences	Multichain	100-1000 TPS	Nein
J.P. Morgan	Quorum	12-100 TPS	Ja
IBM	Hyperledger Fabric	10k-100k TPS	Ja
Coinprism	OpenChain	1000+ TPS	Nein
Chain	Chain Core	N/A	Nein
R3	Corda	N/A	Ja
Monax	Hyperledger Burrow	10k TPS	Ja

Tabelle 5.1: Vergleich diverser Permissioned Blockchain Plattformen [21][63]

5.3 Hyperledger Fabric und Composer - Grundlagen

5.3.1 Hyperledger Fabric

Hyperledger Fabric ist eine Blockchain-Plattform für Business-Netzwerke. Es ist darauf ausgelegt modular (z.B. austauschbare Konsensmechanismen) zu sein, um es einfach erweitern, und somit für möglichst viele Use-Cases nutzbar machen zu können [8]. Im folgenden wird das grundlegende Konzept von Hyperledger Fabric erklärt.

Chaincode Fabric erlaubt den Teilnehmern das Erstellen, Interagieren und Nachverfolgen von digitalen Assets. Diese bestehen letztendlich aus Ansammlungen von Key-Value-Paaren. Für die Interaktion werden Transaktionen genutzt. Die Assets und Transaktionen sind u.a. im Chaincode definiert. Dieser ist letztendlich bei den Nodes im Netzwerk installiert [39]. Da der Chaincode Programmlogik abbildet, kann er auch als Smart Contract bezeichnet werden [64].

Identitätsverwaltung Jede Node im Netzwerk muss eine Identität erhalten. Nur so können die Teilnehmer die Daten lesen und Transaktionen ausführen [39]. Die Registrierung sowie das Erstellen von Zertifikaten wird von einer Certificate Authority (CA) übernommen. Die Teilnehmer selber können CA's sein. So würde zum Beispiel jedes Unternehmen Identitäten und Zertifikate für seine Mitarbeiter erstellen [65].

State Database Jede Node speichert die Blockchain, und zusätzlich eine sogenannte State Database. Diese speichert den aktuellsten Status der digitalen Assets. Anders formuliert, wird sie aus den in der Blockchain enthaltenen Transaktionen erstellt. Neue in Blöcken enthaltene Transaktionen werden auf der State Database ausgeführt. Dies ermöglicht eine hohe Performance: Da die Datenbank im Arbeitsspeicher abgelegt werden kann, sind schnelle Schreib- und Lesevorgänge möglich [39].

Transaktionsfluss: Clients, Peer Nodes, Ordering Nodes In einen Hyperledger Fabric Netzwerk einigen sich die Unternehmen auf den zu nutzenden Chaincode für eine Anwendung. Dieser wird in der Blockchain gespeichert. Clients können über bestimmte Anwendungen Transaktionen über ihre Identität ausführen. Endorser Peer Nodes überprüfen die Rechte des Clients, die Validität der Transaktion, und simulieren diese. Dazu führen sie die Transaktion auf der State Database aus um die Datenänderungen zu erkennen. Diese werden jedoch noch nicht festgeschrieben. Anschließend werden die Transaktionen an eine Ordering Node geschickt. Diese sortiert die Transaktionen nach First-Come-First-Serve Prinzip in einen Block, welcher an die Committer Peer Nodes gesendet wird. Diese hängen den Block an die Blockchain an, und führen die Datenänderungen (bereits simulierte Transaktionen) sequentiell auf der State Database durch. Dabei werden in Konflikt stehende Transaktionen erkannt, und als invalide gekennzeichnet [39].

Development Die Entwicklung für Hyperledger Fabric erfolgt über Chaincode, welcher in Java oder Go geschrieben wird [66]. Um eine schnellere und komfortablere Entwicklung zu erlauben, wird das Framework Hyperledger Composer genutzt. Dieses wird im nächsten Abschnitt genauer betrachtet.

5.3.2 Hyperledger Composer

Hyperledger Composer ist ein Framework für die Anwendungsentwicklung mit Hyperledger Fabric. Es bietet verschiedene Funktionen, welche das implementieren von Blockchain-Applikationen beschleunigen. So ist es u.a. möglich Participants, Assets und Transaktionen zu modellieren, Zugriffsregeln festzulegen und daraus Chaincode sowie REST-API's zu generieren [67]. Dies alles wird in den folgenden Kapiteln genauer erläutert. Es ist zu bedenken, dass Hyperledger Composer kontinuierlich weiterentwickelt wird, weshalb die hier gemachten Angaben nicht mehr aktuell sein müssen [68]. Die Implementierung erfolgt mit Composer v0.16.2.

5.4 Entwicklungsumgebung

Als Entwicklungsumgebung wird eine Vagrant-Box, basierend auf Ubuntu 16.04 genutzt. Dabei handelt es sich um leichtgewichtige VM, mit welcher eine SSH-Verbindung hergestellt wird. Dies erlaubt das Arbeiten mit der VM über die Kommandozeile [69]. Für die Box wird ein Provision-Script geschrieben, welches die benötigten Komponenten installiert um Hyperledger Fabric und Composer nutzen zu können. Dieses kann ebenfalls genutzt werden um beliebige Ubuntu-VM's einzurichten. Zu den Komponenten gehört z.B. das Composer Command Line Interface (CLI), mit welchen man über die Kommandozeile u.a. Chaincode installieren kann [70]. Hyperledger Composer beinhaltet ebenfalls eine Fabric Blockchain-Konfiguration, mit welcher man eine Blockchain mit einem Peer für Entwicklungszwecke starten kann. Im Kapitel 5.7 eine eigene Netzwerkkonfiguration erstellt.

5.5 Business Network Definition

Der erste Schritt der Implementierung ist die Entwicklung der Programmlogik. Diese wird über die Business Network Definition (BND) von Composer erstellt. Aus ihr wird letztendlich der Chaincode generiert, welcher bei den Peer-Nodes installiert wird. Weiterhin besteht die Möglichkeit eine REST-API zu generieren, mit welcher die Nutzer mit den Chaincode interagieren können [71]. Die Anwendungslogik muss den folgenden Workflow erlauben: Maschinen, welche sich im Besitz von Unternehmen befinden, erkennen, dass sie eine Wartung benötigen. Sie führen mit einer von ihnen zugeteilten Identität eine Transaktion aus, welche einen Wartungsvertrag erstellt. Wartungsdienstleister können diesen annehmen. Sie melden sich beim Gerät an und führen die Wartung durch, wobei die Wartungsschritte geloggt werden. Nach ausgeführter Wartung schließt die Maschine den Vertrag. Bei allen Operationen ist zu bedenken, dass sie nur unter bestimmten Konditionen erfolgen dürfen. So kann z.B. ein Wartungsvertrag nur angenommen werden, wenn er nicht bereits von einem anderen Wartungsanbieter akzeptiert wurde. Weiterhin muss eine Preisabsprache zwischen Unternehmen und Wartungsdienstleister erfolgen können.

5.5.1 Anwendungslogik

Die BND besteht aus 4 Dateien. Ein Model-File modelliert die Participants, Assets, sowie Transaktionen. Ein JavaScript-File beschreibt den auszuführenden Code (welcher Daten erstellt und/oder bearbeitet), wenn eine Transaktion aufgerufen wird. Ein ACL-File definiert welcher Participant welche Daten lesen/bearbeiten/löschen darf. Zuletzt gibt es noch ein Query-File, welches Queries definiert, mit welchen man Daten innerhalb der BND abfragen kann. Dieses wird im Rahmen des Prototypen jedoch nicht genutzt. Stattdessen werden die Filter der REST-API genutzt, um Datenabfragen auszuführen (siehe Kapitel 5.6.1) [67].

Model-File Im Model File gilt es die Teilnehmer am Netzwerk, die verfügbaren Assets, die zu implementierenden Transaktionen sowie Events zu definieren. Die Modellierung erfolgt in der Composer Modeling Language [72]

Die Participants des dezentralen Wartungsmarktes sind Unternehmen (*Company*), Wartungsdienstleister (*MaintenanceProvider*) sowie Maschinen (*Machine*). Die Maschinen besitzen einen *Owner*-Key, mit welchen Sie den Unternehmen zugeordnet werden können. Der Grund, warum die Maschinen als Participant definiert sind, ist die Identitätsverwaltung. In Composer kann jeden Participant eine eindeutige Identität zugewiesen werden, über welche Transaktionen ausgeführt werden [73]. So kann z.B. eindeutig zugeordnet werden, welche Maschine einen Wartungsvertrag erstellt. Ein Beispiel für die Definition einer Machine findet sich unter dem Listing 5.1.

```
1 participant Machine identified by machineId {  
2     o String machineId  
3     o String type  
4     o String model  
5     —> Company owner  
6 }
```

Listing 5.1: Modellierung einer Machine. Keys können primitive Datentypen oder Referenzen zu anderen Assets sein.

In der BND bestehen drei Typen von Assets. Der *MachineStatus* gehört zu einer Maschine, und gibt an ob sie funktionstüchtig ist. Der *MaintenanceContract* enthält u.a. Informationen über den Wartungsgrund und den Status der Wartung. Letztendlich gibt es noch die *PaymentAgreement*. Diese dokumentiert die abgesprochene Auszahlung zwischen Unternehmen und Wartungsanbieter für einen bestimmten Wartungsvertrag. Listing 5.2 zeigt die Definition eines MaintenanceContract.

Ebenfalls müssen die zu implementierenden Transaktionen definiert werden, welche letztendlich Assets erstellen und bearbeiten. Die Transaktion *InitMaintenance* wird von einer Maschine aufgerufen um einen Wartungsvertrag zu erstellen. *AcceptMaintenanceContract* wird von Wartungsanbietern aufgerufen um einen Vertrag zu akzeptieren. Ebenfalls wird von ihnen die

```

1 asset MaintenanceContract identified by maintenanceContractId {
2     o String maintenanceContractId
3     o String maintenanceReason
4     o Boolean isAccepted
5     o Boolean isClosed
6     o String[] performedSteps
7     o String requiredLastStep optional
8     —> Machine owner
9     —> MaintenanceProvider maintenanceProvider optional
10 }
11 }

```

Listing 5.2: Modellierung eines MaintenanceContract.

Transaktion *AddPerformedStep* genutzt, um ausgeführte Wartungsschritte zu loggen. Die *CloseContract*-Transaktion wird von der Maschine aufgerufen, nachdem z.B. der Wartungsanbieter einen Knopf an der Maschine drückt, um zu signalisieren, dass die Wartung erfolgt ist. Dabei erfolgt eine Überprüfung, ob der letzte erforderliche Wartungsschritt erfolgt ist. Letztendlich gibt es noch *CreatePaymentAgreement*, welche vom Unternehmen genutzt wird um zu einen Vertrag einen Vorschlag für die Zahlung zu erstellen sowie *AcceptPaymentAgreement*, womit der Wartungsanbieter diese akzeptieren kann. Listing 5.3 zeigt ein Beispiel für eine Transaktionsdefinition. Es gibt noch eine Transaktion welche nichts mit der Funktion der Anwendung zu tun hat: *SetupDemo* wird genutzt um automatisch Beispieldaten zu generieren, damit man schnell neue Funktionen sowie Änderungen an der BND testen kann. An dieser Stelle ist es wichtig zu erwähnen, dass noch weitere Transaktionen, neben den eigen definierten, gibt. Dazu gehören die Standard-Transaktionen zum Abfragen, Erstellen, Bearbeiten und Löschen von Daten (siehe 5.6.1).

```

1 transaction AddPerformedStep {
2     —> MaintenanceContract contract
3     o String performedStep
4 }

```

Listing 5.3: Modellierung der AddPerformedStep-Transaktion. Die Keys sind in diesem Fall die mit der Transaktion übergebenen Parameter.

Zuletzt müssen noch die Events erwähnt werden. Diese werden gesendet, wenn bestimmte Trigger ausgelöst werden. Client-Applikation können diese abonnieren, um so z.B. bei Datenänderungen benachrichtigt zu werden [74]. So wird beispielsweise eine Website zum annehmen von Wartungsverträgen automatisch aktualisiert, sobald ein neuer Vertrag in der Blockchain erstellt wird. Die Events welche bestehen, sind *NewContractCreated* und *ContractClosed*. Ersteres wird im Listing 5.4 definiert.

```

1 | event NewContractCreated {
2 | }

```

Listing 5.4: Modellierung eines Events, welches ausgelöst wird wenn ein neuer Vertrag erstellt wird.

JavaScript-File Im Model-File Kapitel wurden Transaktionen und Events nur definiert. Das Verhalten der Transaktionen sowie die Trigger der Events werden im JavaScript-File festgelegt. Aufgrund der Komplexität des Scripts wird nur beispielhaft die Implementation einer Transaktion sowie eines Events erläutert.

Das Listing 5.5 enthält den JavaScript-Code für die `AcceptMaintenanceContract`-Transaktion. Der übergebene Parameter `tx` enthält die Keys, welche im Model-File für die Transaktion definiert wurden. Bevor die Transaktion ausgeführt wird, wird überprüft ob der Contract bereits akzeptiert wurde, und ob der Wartungsanbieter, welcher die Transaktion ausführt, die benötigte Erfahrung mit der zu wartenden Maschine hat (siehe Zeile 9-12). In Zeile 14-15 werden die neuen Werte für die Keys im `MaintenanceContract` gesetzt, damit der Vertrag als akzeptiert gilt. Die Änderungen muss nun noch in der State Database ausgeführt werden. Dazu wird in Zeile 18-21 die Asset-Registry aufgerufen, welche alle Assets enthält, und das Update ausgeführt.

Das Listing 5.6 zeigt einen Auszug aus der `InitMaintenance`-Transaktion. Nachdem in Zeile 2-3 ein Vertrag erstellt und der Asset-Registry hinzugefügt wurde, wird in Zeile 7-9 das im Model-File definierte Event `NewContractCreated` gesendet.

ACL-File Die Zugriffsregeln (ACL-Rules) bestimmen die Schreib-und Leserechte der einzelnen Participants. Eine Art solche Regeln festzulegen wurde schon im vorherigen Abschnitt kurz gezeigt. Im JavaScript-Code im Listing 5.5 in Zeile 12 wird überprüft, ob ein Anbieter die benötigte Erfahrung mit der zu wartenden Maschine hat. Es empfiehlt sich jedoch solche Regeln im ACL-File festzulegen, damit man eine zentrale Stelle für diese hat, und die eventuell fehlende Berechtigung vor dem Ausführen des Codes erkennt. Ein weiteres Beispiel für eine ACL-Rule wäre, dass nur Wartungsanbieter, welche einen Wartungsvertrag angenommen haben, durchgeführte Wartungsschritte eintragen dürfen. Ein Beispiel dafür wäre Listing 5.7. In Zeile 6 wird überprüft, ob der im Vertrag angegebene Wartungsanbieter die Transaktion ausführt.

Den ACL-Rules fehlt in der genutzten Version von Composer ein nützliches Feature. Man kann Participants Rechte nur auf gesamte Assets, allerdings nicht auf einzelne Keys dieser Assets geben. Damit ein Wartungsanbieter die eben genannte Transaktion ausführen kann, benötigt er Update-Rechte für den Wartungsvertrag. Damit könnte er über eine Standard-Update-Transaktion den Status des Vertrags auf geschlossen stellen, obwohl nur eine Maschine die `CloseContract`-Transaktion ausführen kann. Das einzige was Participants davon abhält andere Teilnehmer dadurch zu schädigen, ist die Tatsache das jede ausgeführte Transaktion und die dazugehörige Identität in der Blockchain gespeichert wird [39].


```

1 /**
2  * Accept the MaintenanceContract
3  * @param {biz.innovationcenter.maintenance.AcceptMaintenanceContract} tx The
4  *   ↳ transaction instance.
5  * @transaction
6  */
7 function acceptMaintenanceContract(tx) {
8
9     //Check if the contract is already accepted
10    if (tx.maintenanceContract.isAccepted === false) {
11        //Check if the Participant has the required experience
12        if (tx.maintenanceContract.owner.type === getCurrentParticipant().
13            ↳ experienceWith) {
14            //Set the new Contract Data for the contract parameter
15            tx.maintenanceContract.isAccepted = true;
16            tx.maintenanceContract.maintenanceProvider = getCurrentParticipant()
17                ↳ ;
18
19            // Get the contract from the asset registry
20            return getAssetRegistry('biz.innovationcenter.maintenance.
21                ↳ MaintenanceContract')
22                .then(function (assetRegistry) {
23                    // Update the contract in the asset registry.
24                    return assetRegistry.update(tx.maintenanceContract);
25                });
26        } else {
27            error = 'Error: Provider does not have required experience';
28        }
29    } else {
30        error = 'Error: Contract is already accepted';
31    }
32
33    if (error !== null) {
34        console.error(error);
35        throw error;
36    }
37 }

```

Listing 5.5: JavaScript-Code für die AcceptMaintenanceContract-Transaktion

```

1 //...
2 .then(function (contractRegistry) {
3     return contractRegistry.add(contract);
4 })
5 .then(function () {
6     //Emit event
7     var factory = getFactory();
8     var newContractEvent = factory.newEvent(NAMESPACE, 'NewContractCreated');
9     emit(newContractEvent);
10 });

```

Listing 5.6: Auszug aus der InitMaintenance-Transaktion. Ein Event wird gesendet, nachdem ein neuer Vertrag erstellt wurde.

```

1 rule ProviderCanExecuteAddPerformedStepTransaction {
2     description: "Maintenance provider can add performed maintenance steps to
3         ↪ his accepted contract"
4     participant(p): "biz.innovationcenter.maintenance.MaintenanceProvider"
5     operation: CREATE
6     resource(r): "biz.innovationcenter.maintenance.AddPerformedStep"
7     condition: (r.contract.maintenanceProvider.getIdentifier() == p.
8         ↪ getIdentifier())
9     action: ALLOW
10 }

```

Listing 5.7: Auszug aus der InitMaintenance-Transaktion. Ein Event wird emittet.

5.5.2 Installation

Die Schritte für die Installation der BND erfolgen über das Composer CLI. Zunächst wird aus ihr ein Business Network Archive (BNA) generiert. Dieses wird bei den einzelnen Peers installiert, welche durch ein Connection Profile angegeben werden. Dieser Vorgang wird genauer im Kapitel 5.7 beschrieben. Für Entwicklungszwecke genügt zunächst die Installation bei den bereitgestellten Peer von Hyperledger Composer.

5.6 Client Applications

Nachdem die BND besteht, gilt es Client-Applikationen zu implementieren, um mit dieser zu interagieren. Dazu wird zuerst die REST-API erläutert, welche die Voraussetzung für die Anwendungen darstellt. Anschließend wird auf die Angular-Web-Anwendungen und die Gerätesimulation über eine Node.js Anwendung eingegangen. Um zu garantieren, dass die Client-Applications nicht von einer zentralen Instanz verwaltet werden, würde jeder Teilnehmer selber Rest-Server sowie die Applikationen hosten.

5.6.1 REST-API

Hyperledger Composer bietet die Möglichkeit, eine REST-Schnittstelle aus der BND zu generieren. Sie erlaubt das Abfragen, Erstellen, Bearbeiten und Löschen von Assets, sowie das ausführen von Transaktionen. Dies erfolgt über GET oder POST Requests an bestimmte URL's. Beispiele dazu werden im folgenden Kapitel genannt. Zu der generierten API gehört ebenfalls eine Weboberfläche (siehe Abb. 5.1, welche einen Überblick über alle zur Verfügung stehenden REST-Aufrufe gibt, sowie die Ausführung dieser erlaubt. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass die REST-API im Prototypen nur einen eingeloggten Nutzer unterstützt. Dieser wird im Source Code festgelegt. Dies führt dazu, dass für das Ausführen von Transaktionen mit unterschiedlichen Identitäten, unterschiedliche REST-Server genutzt werden müssen [75].

5.6.2 Webanwendungen

Maintenance-App Die Maintenance-App ist eine Angular-Webanwendung. Mit ihr können Wartungsanbieter noch nicht angenommene Wartungsverträge einsehen und akzeptieren. Weiterhin kann das Loggen von Wartungsschritten sowie das Überprüfen der Vertragsschließung erfolgen. Ein Screenshot der Anwendung findet sich bei der Abbildung 5.2. In der aktuellen Implementationen ist der eingeloggte Nutzer durch den genutzten REST-Server definiert. Im folgenden werden Codebeispiele zu den Abfragen und Erstellen von Assets sowie dem abonnieren von Events gezeigt.

Listing 5.8 zeigt die Abfrage aller existierenden Wartungsverträge über einen GET-Request. Dieser wird an die in Zeile 2 angegebene URL, an den REST-Server geschickt.

Hyperledger Composer REST server		
AcceptMaintenanceContract : A transaction named AcceptMaintenanceContract Show/Hide List Operations Expand Operations		
GET	/AcceptMaintenanceContract	Find all instances of the model matched by filter from the data source.
POST	/AcceptMaintenanceContract	Create a new instance of the model and persist it into the data source.
GET	/AcceptMaintenanceContract/{id}	Find a model instance by {{id}} from the data source.
CloseContract : A transaction named CloseContract Show/Hide List Operations Expand Operations		
Company : A participant named Company Show/Hide List Operations Expand Operations		
GET	/Company	Find all instances of the model matched by filter from the data source.
POST	/Company	Create a new instance of the model and persist it into the data source.
GET	/Company/{id}	Find a model instance by {{id}} from the data source.
HEAD	/Company/{id}	Check whether a model instance exists in the data source.
PUT	/Company/{id}	Replace attributes for a model instance and persist it into the data source.
DELETE	/Company/{id}	Delete a model instance by {{id}} from the data source.
InitMaintenance : A transaction named InitMaintenance Show/Hide List Operations Expand Operations		

Abbildung 5.1: Generierte REST-API zu der BND. GET und POST Requests werden für Datenabfragen sowie das Ausführen von Transaktionen genutzt.

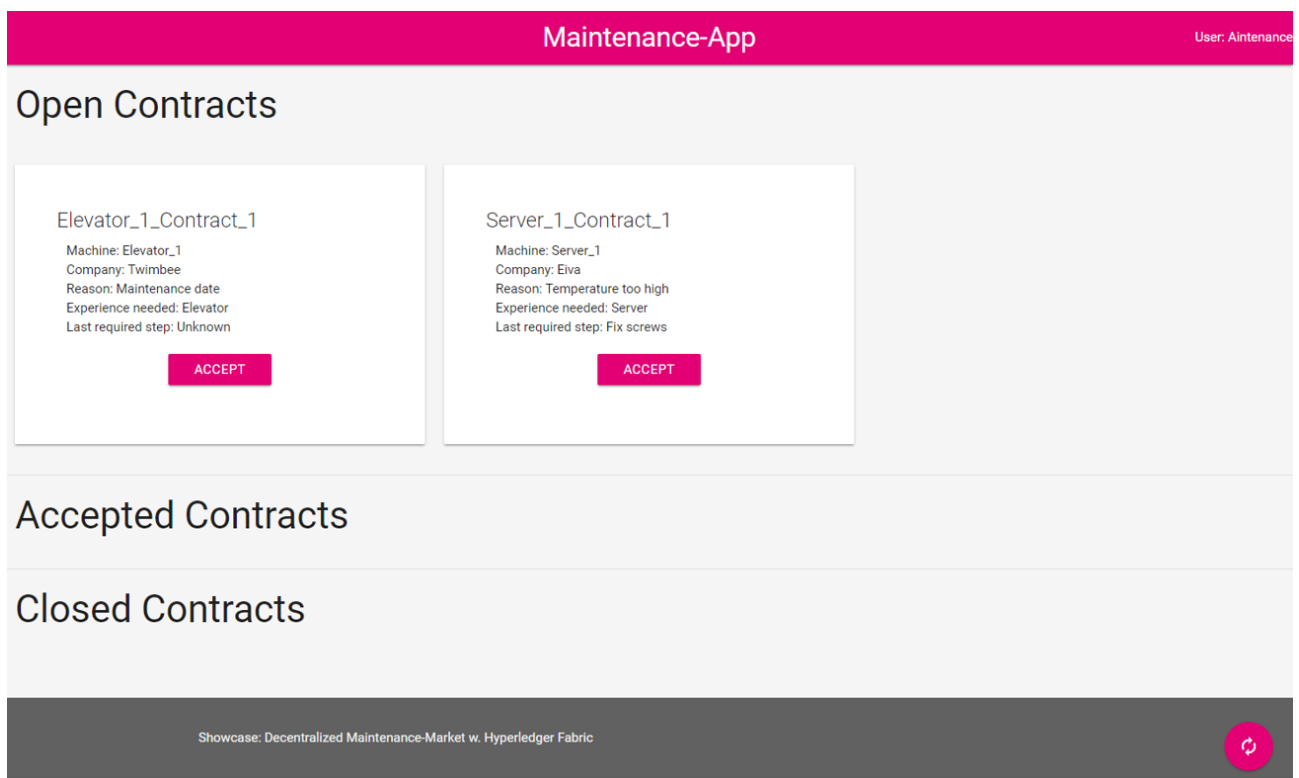


Abbildung 5.2: Angular-Maintenance-App. Vom Wartungsdienstleistern zum Verwalten der Wartungsverträge genutzt.

```

1 public fetchAllContracts() : Observable<any> {
2     let API_BASE = "http://10.40.94.180:12100/api/";
3     return this.http.get(API_BASE + "MaintenanceContract");
4 }

```

Listing 5.8: Abfrage aller existierenden Wartungsverträge

Es ist ebenfalls möglich GET-Requests mit Filtern auszuführen. Im Listing 5.9 werden nur Wartungsverträge abgefragt, welche von den eingeloggtten Wartungsanbieter akzeptiert, aber noch nicht geschlossen wurden. Die dazu in Zeile 5 entstandene URL wurde von der REST-Weboberfläche generiert.

```

1 public getAcceptedContracts() : Observable<any> {
2     let API_BASE = "http://10.40.94.180:12100/api/";
3     let PROVIDERNAME = "Aintenance";
4
5     return this.http.get(API_BASE + "MaintenanceContract?filter=%7B%22where%22%3
    ↪ A%7B%22and%22%3A%5B%7B%22isAccepted%22%3Atrue%7D%2C%7B%22isClosed%22%3
    ↪ Afalse%7D%2C%20%7B%22maintenanceProvider%22%3A%22resource%3Abiz.
    ↪ innovationcenter.maintenance.MaintenanceProvider%23" + PROVIDERNAME +
    ↪ "%22%7D%5D%7D%7D");
6 }

```

Listing 5.9: Abfrage aller existierenden Wartungsverträge

Zuletzt wird ein Beispiel zum Ausführen einer Transaktion gezeigt. Wartungsanbieter können über die *AddPerformedStep*-Transaktion die Wartungsschritte loggen. Listing 5.10 zeigt den dafür auszuführenden POST-Request. In Zeile 2-6 wird ein JSON-Objekt erstellt, welches die auszuführende Transaktion sowie ihre Parameter festlegt. Dazu gehört der zu bearbeitende Vertrag, sowie der ausgeführte Wartungsschritt. Letztendlich wird das JSON-Objekt als Parameter der POST-Request übergeben, und der im JavaScript-File der BND angegebene Code der Transaktion ausgeführt.

```

1 public addPerformedStep(operation : string, contractId : string) : Observable<
    ↪ any> {
2     const body = {
3         "$class": "biz.innovationcenter.maintenance.AddPerformedStep",
4         "contract": contractId,
5         "performedStep": operation
6     };
7     return this.http.post(API_BASE + 'AddPerformedStep', body);
8 }

```

Listing 5.10: Abfrage aller existierenden Wartungsverträge

Composer Playground Der Hyperledger Composer Playground ist eine in Composer enthaltene Webanwendung. Sie wird hauptsächlich während der Entwicklung zum Testen der BND verwendet. Über den Playground können Participants sowie Identitäten für diese erstellt werden. Ebenfalls ist es möglich Assets zu erstellen und zu bearbeiten. Was die Anwendung jedoch auch für den Endnutzer attraktiv machen, ist dass sie einen Überblick über alle bestehenden Daten gibt. Weiterhin ist es möglich Transaktionen ausführen und die Historie aller durchgeführten Transaktionen einzusehen. Es ist jedoch nicht möglich Daten zu filtern. Im bestehenden Prototypen soll der Playground hauptsächlich von den Unternehmen eingesetzt werden, um die Daten der Maschinen und Wartungsverträge einzusehen. Weiterhin muss er in der aktuellen Version von den Unternehmen und Wartungsanbietern genutzt werden um die Preisabsprachen in der Blockchain zu dokumentieren. Bei einer Weiterentwicklung sollten dafür ebenfalls Webanwendungen entwickelt werden.

5.6.3 XDK-Trigger

Um die Simulation von Wartungsgeräten zu realisieren, wird ein Bosch Cross Domain Kit (XDK) genutzt. Dabei handelt es sich um ein Gerät mit diversen Sensoren. So misst es u.a. Temperatur, Luftfeuchtigkeit sowie Beschleunigung (bzw. G-Kräfte). Auf dem XDK ist ein Programm installiert, welches die Sensordaten über USB per Serial Port überträgt. Wenn bestimmte Daten angeliefert werden, sollen Transaktionen ausgeführt werden, um Wartungsverträge zu erstellen und zu schließen. Dafür wird eine Node.js-Anwendung geschrieben.

Um die Daten mit der Node.js Anwendung zu lesen wird das Package *node-serialport* [76] genutzt. Ein Wartungsvertrag wird erstellt, sobald die Luftfeuchtigkeit einen bestimmten Schwellwert überschreitet. Das Schließen von Wartungsverträgen erfolgt, sobald das Gerät auf den Kopf gedreht wird. Dies würde das Drücken eines Knopfes an der zu wartenden Maschine simulieren, womit der Wartungsanbieter die fertige Wartung signalisiert sowie die Schließung des Vertrags beantragt. Damit die Transaktionen mit der Identität einer Maschine ausgeführt werden, muss ein dementsprechend konfigurierter REST-Server existieren.

Listing 5.11 zeigt, wie mit dem Überschreiten der Luftfeuchtigkeitsschwellwerts umgegangen wird. In Zeile 7 wird die Funktion *createSmartContract* aufgerufen. Dieser führt die InitMaintenance-Transaktion über einen POST-Request aus. Dabei werden zufällige Werte für die Parameter *contractId*, *maintenanceReason* und *lastRequiredStep* übergeben.

5.7 Netzwerkkonfiguration

Die Netzwerkkonfiguration besteht aus dem Erstellen einer Fabric-Netzwerk-Konfiguration, sowie dem Konfigurieren von Composer zum Installieren der BND.

```

1 function handleHumidityEvent() {
2     var HUMIDITY_TRIGGER = 70;
3     //If the humidity is too high, create a smart contract
4     if (jsonData.humidity >= HUMIDITY_TRIGGER) {
5         if (humidityFirstTimeExceeded) {
6             //Execute InitMaintenance-Transaction via POST-Request
7             console.log("HUMIDITY TOO HIGH! MY HAIR!!!");
8             createSmartContract();
9         }
10        humidityFirstTimeExceeded = false;
11    } else {
12        humidityFirstTimeExceeded = true;
13    }
14 }

```

Listing 5.11: Erstellen eines Wartungsvertrags bei der Überschreitung des Luftfeuchtigkeitsschwellwertes.

5.7.1 Fabric-Netzwerk-Konfiguration

Um das Blockchain-Netzwerk zu konfigurieren und zu starten, müssen Orderer Nodes, Peer Nodes, Certificate Authorities und Channel in mehreren Dateien definiert werden. Um diesen Prozess zu vereinfachen, wird das Tool *netcomposer* [77] genutzt. Dieses erstellt aus einem einzigen Konfigurationsfile alle benötigten Dateien um ein Blockchain-Netzwerk zu starten.

In dem zu erstellenden Netzwerk soll es zwei Unternehmen (Eiva und Twimbee), zwei Wartungsanbieter (Repairr und Aintenance), sowie zwei Maschinen (Server_1 und Machine_1), welche zu den Unternehmen gehören, geben (siehe Abb. 5.3). Eine verkürzte Konfiguration dafür ist im Listing 5.12 angegeben. In Zeile 1 wird der genutzte Konsensmechanismus angegeben. In der aktuellen Implementation gibt es nur eine Ordering Node. Der Grund dafür wird genauer im Kapitel 5.8 erläutert. In Zeile 4 wird die für die State Database zu nutzende Datenbank definiert. Von Zeile 10-21 werden die Channels konfiguriert. Der Channel *mychannel* ist der öffentliche Channel, während *privatechannel* nur zwischen 2 Organisationen besteht.

Aus diesem Konfigurationsfile werden verschiedene Dateien generiert, u.a. auch ein Docker-Compose-File. Fabric nutzt Docker-Container¹, um die Peer Nodes, Ordering Nodes, State Databases, und Certificate Authorities zur Verfügung zu stellen. Das Docker-Compose-File wird genutzt um die im Konfigurationsfile angegebenen Komponenten zu starten. Nach dem Start der Container muss die Kommandozeile genutzt werden um die Channel zu starten und die Peers diesen hinzuzufügen. Dies erfolgt letztendlich über selbst erstellte Shell-Skripte.

¹Docker-Container: Virtualisiertes Abbild, welches eine Applikation und alle Ressourcen zur Ausführung dieser beinhaltet [78].

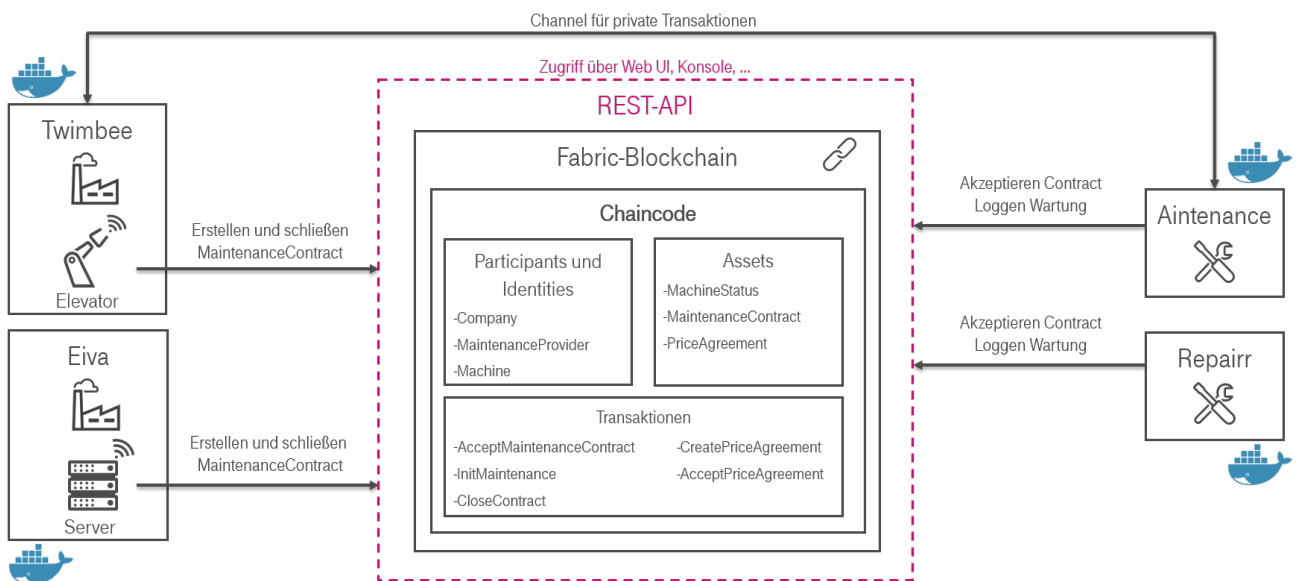


Abbildung 5.3: High-Level-Architektur des zu entstehenden Fabric-Netzwerks

```

1 orderer :
2     type: "solo"
3 db:
4     provider: "CouchDB"
5
6 organizations:      4
7 peersPerOrganization:  1
8 usersPerOrganization: 1
9
10 channels:
11     - name: mychannel
12         organizations:
13             - organization: 1
14             - organization: 2
15             - organization: 3
16             - organization: 4
17
18     - name: privatechannel
19         organizations:
20             - organization: 1
21             - organization: 2

```

Listing 5.12: Konfiguration des Fabric-Netzwerks (Verkürzt).

5.7.2 Composer-Konfiguration

Um die BND zu installieren, müssen Connection Profiles erstellt werden. Über diese wird Composer u.a. mit den IP-Adressen der Peers bekannt gemacht. In der genutzten Version von Composer müssen für jede Organisation je Channel 2 Profile erstellt werden. Anschließend müssen über die Kommandozeile Identitäten beantragt werden, über welche die Installation der BND erfolgt. Ebenfalls werden Identitäten erstellt, welche die Admins der BND der einzelnen Organisationen darstellen. Letztendlich wird die *SetupDemo*-Transaktion ausgeführt, um die Beispieldaten zu erstellen. Im Zuge dessen werden auch Identitäten für die Maschinen erstellt. Der Prozess erfolgt über selber erstellte Shell-Skripte. Der gesamte Vorgang ist im Detail genauer unter [79] beschrieben.

5.8 Konsensmechanismus

Kapitel 4.2 beschreibt verschiedene Konsensmechanismen. Für den Use-Case empfiehlt sich die Nutzung des PBFT. Dieser erlaubt bei der Teilnehmerzahl von 4 Nodes einen Transaktionsdurchsatz von mehr als 14000 TPS. Weiterhin werden bis zu $\frac{1}{3}$ an unvertrauenswürdigen Nodes toleriert. Hyperledger Fabric hat den PBFT allerdings noch nicht für die einfache Nutzung und Konfiguration implementiert. Dies soll in Zukunft jedoch noch erfolgen [80]. Für den Prototypen müsste also eine Implementation des PBFT manuell erfolgen. Aufgrund des Zeitaufwands erfolgt dies im Rahmen der Prototyp-Entwicklung nicht.

5.9 Showcase-Demo

Letztendlich wurde für den Prototypen eine Demo entworfen. Diese demonstriert die Funktionsweise sowie diverse Workflows der Anwendung. Die Komponenten der Demo werden in Abbildung 5.4 visualisiert. Alle Komponenten können innerhalb genannten Entwicklungsumgebung, oder auf einen Server mit einer Ubuntu-VM laufen. Das Unternehmen Twimbee, welches einen Server besitzt ist eine Node des Netzwerks. Auf dieser Node läuft ebenfalls ein REST-Server, über welchen der Server Wartungsverträge auf der (lokal laufenden) Blockchain erstellen kann. Weiterhin nutzt Twimbee den Playground um Daten auf der öffentlichen sowie privaten Blockchain einzusehen. Auf den privaten Channel werden über den Playground ebenfalls Preisabsprachen dokumentiert. Der Wartungsanbieter Aintenance hat einen ähnlichen Aufbau. Der einzige Unterschied besteht darin, dass Aintenance anstatt eines Servers, eine Webapplikation lokal laufen hat, welche mit seinen REST-Server kommuniziert. Eine noch nicht erwähnte Applikation ist der Hyperledger Blockchain Explorer [81]. Über ihn erfolgt die Einsicht und Visualisierung der Rohdaten auf der Blockchain. Die Anwendung kann ebenfalls bei jeden Teilnehmer selber bereitgestellt sein. Zuletzt wurde für die Demo wurde eine Weboberfläche entworfen, welche den Aufruf der vorgestellten Webapplikationen erlaubt.

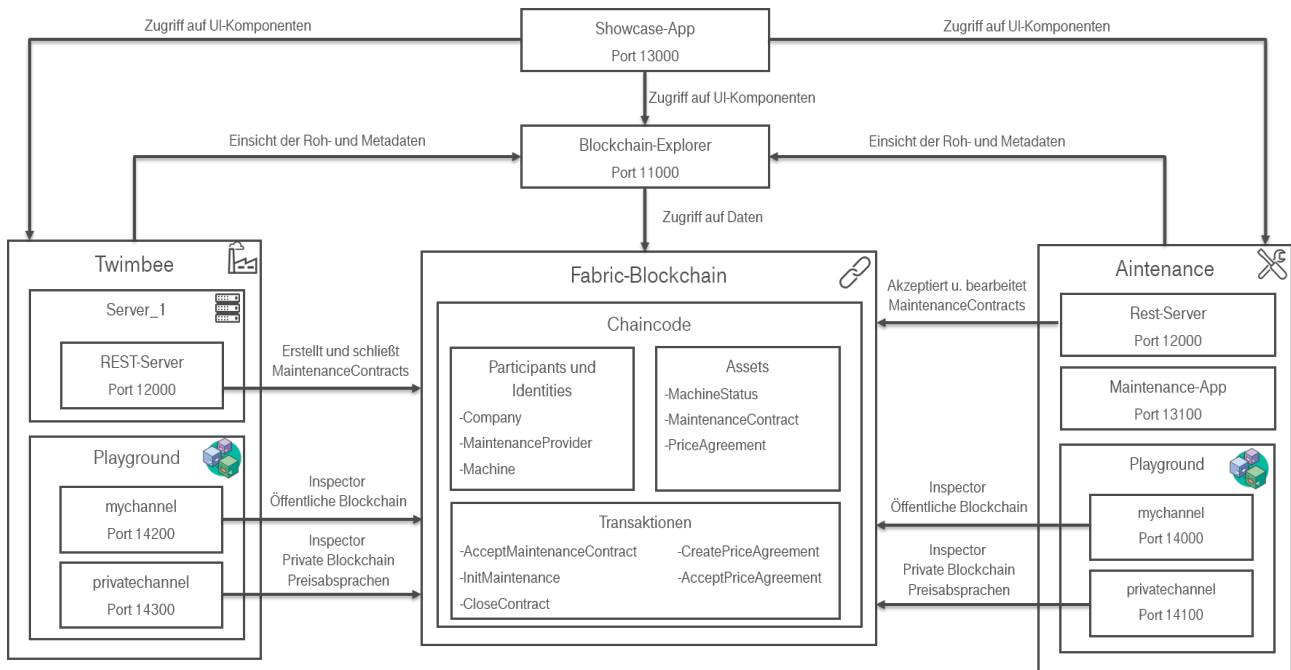


Abbildung 5.4: Architektur der Demo-Komponenten

In der Demo sollen die Workflows der Sequenzdiagramme in den Abbildungen 5.5 und 5.6 gezeigt werden. Das erste Sequenzdiagramm beschreibt den Workflow für die Wartung eines Geräts. Zunächst wird die Webapplikation der Wartungsanbieter geöffnet. Der Bosch XDK wird angehaucht, um den Schwellwert für die Luftfeuchtigkeit zu überschreiten. Anschließend wird vom ihm die *InitMaintenance*-Transaktion aufgerufen, und somit ein Wartungsvertrag erstellt. Dieser Wartungsvertrag wird daraufhin in der Webapplikation sichtbar und angenommen. Danach werden verschiedene Wartungsschritte geloggt, inklusive des letzten geforderten Schrittes. Die eingetragenen Schritte werden ebenfalls in der Webapplikation sichtbar. Letztendlich wird der Bosch XDK auf den Kopf gedreht, womit die Schließung der Vertrags beantragt wird. Ist der letzte erforderliche Wartungsschritt in der Blockchain eingetragen, ist dies erfolgreich.

Anschließend wird kurz der Playground für die Dateneinsicht vorgestellt. In Zuge dessen wird gezeigt, dass es möglich ist den Playground auf den öffentlichen und privaten Channel zu nutzen. Um die Funktion des privaten Channels zu zeigen, wird eine Preisabsprache von Twimbee erstellt. Wenn der Wartungsanbieter mit dieser einverstanden ist, kann er sie akzeptieren. Unabhängig davon kann gezeigt werden, dass die Preisabsprache nicht im öffentlichen Channel vorkommt.

In der Demo erfolgt als letztes die Demonstration des Blockchain Explorer. Über ihn kann man u.a. die Anzahl der bestehenden Blöcke und Peers sowie die Details der Transaktionen einsehen.

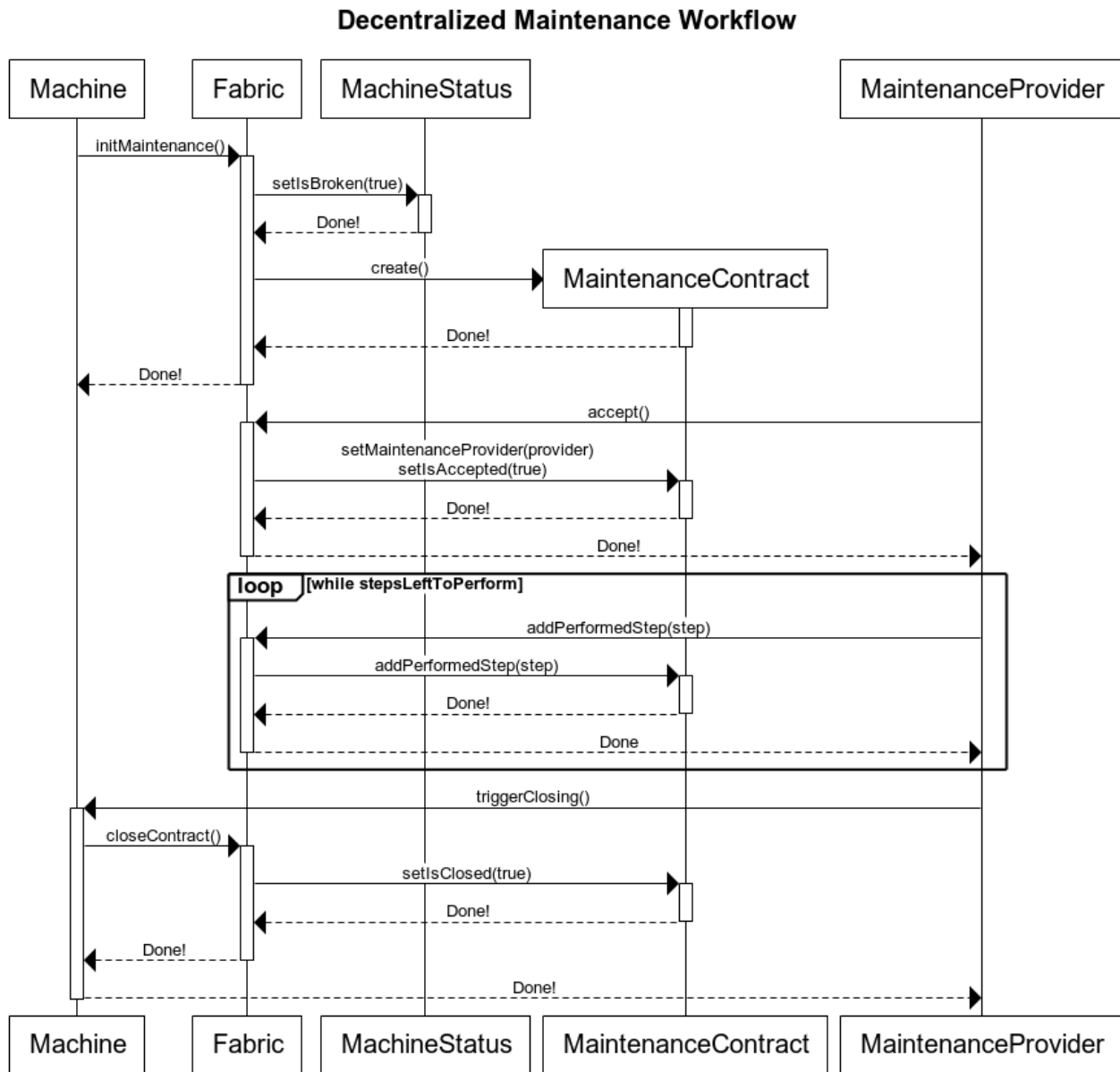


Abbildung 5.5: Workflow für die Wartung.

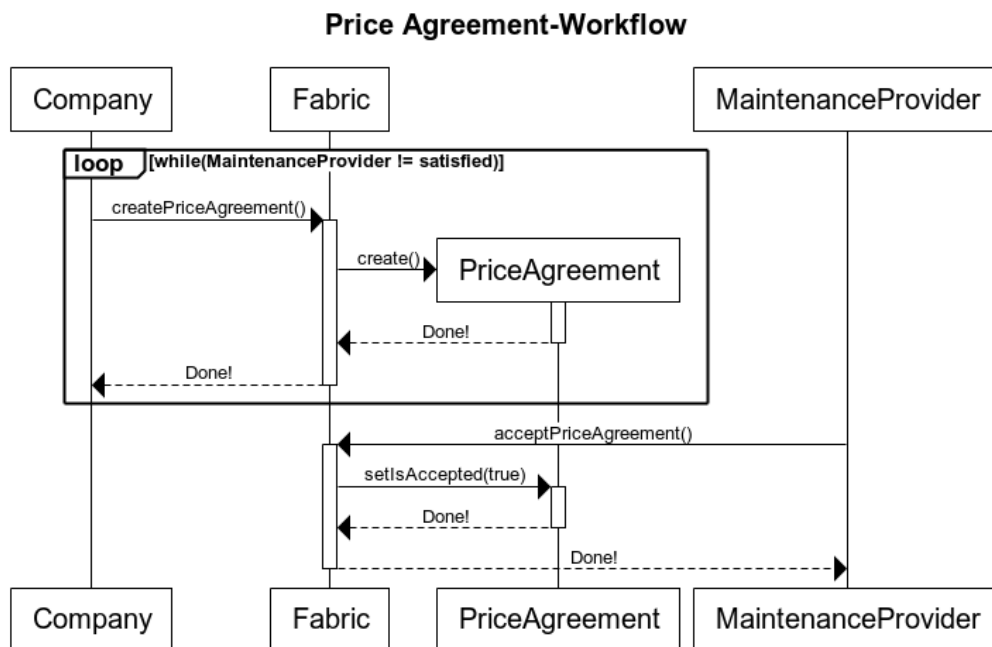


Abbildung 5.6: Workflow für die Preisabsprache.

Kapitel 6

Fazit und Ausblick

Die Blockchain-Technologie hat das Potential dezentrale Anwendungen zu ermöglichen, in welchen Transaktionen nicht manipuliert oder gelöscht werden können. Öffentliche Blockchains bringen jedoch noch Probleme bezüglich Skalierbarkeit und Privatsphäre mit sich. Permissioned Blockchains können diese Probleme zu Teilen lösen, nehmen dafür aber eine stärkere Zentralisierung und eventuell weniger sichere Konsensmechanismen in Kauf.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde ein dezentraler Wartungsmarkt entwickelt. Die Implementation von diesen mit der Blockchain bringt verschiedene Vorteile gegenüber klassischen B2B-Anwendungen mit sich. Die Teilnehmer müssen nicht einer zentral verwaltenden Instanz vertrauen, und können ihre Daten trotzdem an einer zentralen Stelle zur Verfügung stellen.

Die Implementation erfolgte dabei mit Hyperledger Fabric. Damit kann ein Transaktionsdurchsatz von mindestens 350 TPS erreicht werden, abhängig von den genutzten Hardware sowie der Anzahl an Teilnehmern am Netzwerk. Ebenfalls konnte beim Vergleich verschiedener Konsensmechanismen der PBFT gefunden werden, welcher $\frac{1}{3}$ an unvertrauenswürdigen Nodes toleriert und einen Transaktionsdurchsatz von 4500 TPS erzielen kann. Dies hängt jedoch ebenfalls von der Anzahl an Teilnehmern ab.

Der dezentrale Wartungsmarkt kann in diversen Bereichen erweitert werden. So können beispielsweise Remote-Support-Verträge eingeführt werden. So könnten die Wartungsanbieter am Gerät, falls sie mit der Wartung keinen Erfolg haben, Hilfe über ihr Smartphone oder ihre Smart Glasses anfordern. Experten, welche Teilnehmer an der Blockchain sind, würden dann z.B. über ein Videogespräch den Support leisten. Ein weiteres interessantes Konzept ist ein Reputation System. Heutige Bewertungssysteme haben das Problem, dass falsche Bewertungen abgegeben werden, z.B. um Nutzer zu schädigen. Die Bewertung der Wartungsanbieter könnte jedoch automatisch über in der Blockchain bestehende Daten, wie zum Beispiel die benötigte Zeit für eine Wartung, erfolgen. Solche Systeme werden ebenfalls in den Arbeiten von Carboni [82] und Dennis [83] vorgestellt.

Der Prototyp des dezentralen Wartungsmarktes stellt ein Proof-of-Concept für diese da. Es gilt jedoch noch verschiedene Dinge zu bedenken, Limitationen zu untersuchen und Funktionen

zu verbessern. So müsste der maximal mögliche Transaktionsdurchsatz von Hyperledger Fabric mit leistungsstarken Computern untersucht werden, um eine Aussage darüber zu treffen ob ein Wartungsmarkt mit mehreren tausend Teilnehmern und Maschinen bestehen kann. Diesbezüglich muss ebenfalls eine Analyse des PBFT erfolgen, wenn es mehr als 64 Nodes gibt. Ebenfalls besteht die Frage, ob es ausreichend ist, wenn $\frac{1}{3}$ an unvertrauenswürdigen Teilnehmern toleriert werden.

Ebenfalls bringt Hyperledger Fabric und Composer selber Probleme mit sich. Die Konfiguration eines Netzwerks ist mit sehr viel Aufwand verbunden. Um in der aktuellen Prototyp neue Teilnehmer hinzuzufügen, muss eine neue Konfiguration erstellt werden, womit auch alle davon abhängigen Shell-Skripte bearbeitet werden müssen.

Das fehlende Data Sharing zwischen Channeln sorgt für zusätzlichen Aufwand. Es ist nicht möglich, Daten vom Public Channel mit dem Private Channel zu teilen. So können private Transaktionen keine Referenz zu einem im Public Channel bestehenden Asset herstellen.

Ein letzter Punkt, welcher in Bezug zu Blockchain-Anwendungen erwähnt werden muss, ist dass die Blockchain keine Datenrichtigkeit garantiert. So sagen z.B. Wüst u. a., dass "das Interface zwischen physischer und digitaler Welt" ein Problem darstellt [2]. So könnte z.B. beim Prototyp ein Wartungsanbieter durchgeführte Wartungsschritte dokumentieren, welche gar nicht erfolgt sind. Um das zu lösen, könnte ein Sensor anhand verschiedener Daten überprüfen ob ein Wartungsschritt erfolgt ist. Dann muss allerdings diesem vertraut werden. Um Wartungsanbieter zu schädigen, könnte dieser von Unternehmen manipuliert sein. Letztendlich garantiert die Blockchain nur, dass eingetragene Daten bzw. ausgeführte Transaktionen nicht manipuliert und lösbar sind, sowie bei allen Teilnehmern gleich vorkommen. Um falschen Input zu verhindern müssen andere Lösungen gefunden werden.

Auch wenn es noch Fragen zu klären gilt, zeigt der entwickelte Wartungsmarkt die Machbarkeit von Blockchain-Anwendungen für B2B. Ob die Blockchain jedoch in Zukunft klassische B2B-Anwendungen ablöst wird sich erst noch zeigen. Die Probleme der Technologie sowie der Nutzen von Permissioned Blockchains müssen weiterhin untersucht werden. Ebenfalls wichtig ist, dass mehr Blockchain-Anwendungen in der Produktion eingesetzt werden. So werden die sinnvollen Use-Cases ergründet und die Technologie besser verstanden. Nur so kann sich die Blockchain im B2B-Bereich etablieren.

Literatur

- [1] Kari Korpela, Jukka Hallikas und Tomi Dahlberg. “Digital Supply Chain Transformation toward Blockchain Integration”. In: 4. Jan. 2017. ISBN: 978-0-9981331-0-2. DOI: 10.24251/HICSS.2017.506. URL: <http://scholarspace.manoa.hawaii.edu/handle/10125/41666> (besucht am 25.12.2017).
- [2] Karl Wüst und Arthur Gervais. *Do You Need a Blockchain?* 375. 2017. URL: <http://eprint.iacr.org/2017/375> (besucht am 08.11.2017).
- [3] Michael Crosby. *BlockChain Technology: Beyond Bitcoin*. 2016.
- [4] Andreas M. Antonopoulos. *Mastering Bitcoin*. First edition. OCLC: ocn876351095. Sebastopol CA: O'Reilly, 2015. 272 S. ISBN: 978-1-4493-7404-4 978-1-4919-0260-8.
- [5] Satoshi Nakamoto. *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. 2008.
- [6] Ethereum Team. *Ethereum White Paper*. ethereum, 27. Dez. 2017. URL: <https://github.com/ethereum/wiki/wiki/White-Paper> (besucht am 27.12.2017).
- [7] Zibin Zheng u. a. “Blockchain Challenges and Opportunities: A Survey”. In: *International Journal of Web and Grid Services*. 14. Dez. 2017.
- [8] Hyperledger Fabric Team. *Hyperledger Whitepaper*. 2016. URL: https://docs.google.com/document/d/1Z4M_qwILLRehPbVRUsJ30F8Iir-gqS-ZYe7W-LE9gnE/edit?usp=embed_facebook (besucht am 08.11.2017).
- [9] Ameer Rosic. *What Is Hashing? Under The Hood Of Blockchain*. Juli 2017. URL: <https://blockgeeks.com/guides/what-is-hashing/> (besucht am 29.01.2018).
- [10] Hyperledger Composer Team. *Access Control Language - Hyperledger Composer*. URL: https://hyperledger.github.io/composer/unstable/reference/acl_language (besucht am 27.12.2017).
- [11] Wikimedia Commons. *Public Key Signing*. 7 August 2006 (original upload date). URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Public_key_signing.svg (besucht am 29.01.2018).
- [12] Bitcoin Team. *Bitcoin Glossar*. URL: <https://bitcoin.org/de/glossar> (besucht am 27.12.2017).
- [13] Etherscan. *Ethereum Network HashRate Growth Chart*. URL: <https://etherscan.io/chart/hashrate> (besucht am 27.12.2017).

- [14] Etherscan. *Ethereum Average BlockTime Chart*. URL: <https://etherscan.io/chart/blocktime> (besucht am 28.12.2017).
- [15] Bitcoinmining. *Learn about Bitcoin Mining Hardware*. URL: <https://www.bitcoinmining.com/bitcoin-mining-hardware/> (besucht am 04.01.2018).
- [16] BitcoinStats. *Bitcoin Propagation Data*. URL: <http://bitcoinstats.com/network/propagation/> (besucht am 28.12.2017).
- [17] Christian Decker und Roger Wattenhofer. "Information Propagation in the Bitcoin Network". In: *Peer-to-Peer Computing (P2P), 2013 IEEE Thirteenth International Conference On*. IEEE, 2013, S. 1–10.
- [18] H. Sukhwani u. a. "Performance Modeling of PBFT Consensus Process for Permissioned Blockchain Network (Hyperledger Fabric)". In: *2017 IEEE 36th Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS)*. 2017 IEEE 36th Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS). Sep. 2017, S. 253–255. DOI: 10.1109/SRDS.2017.36.
- [19] Stefano De Angelis u. a. "PBFT vs Proof-of-Authority: Applying the CAP Theorem to Permissioned Blockchain". In: *Italian Conference on Cybersecurity*. Unter Mitarb. von Stefano De Angelis u. a. 2017. URL: <https://eprints.soton.ac.uk/415083/> (besucht am 08.11.2017).
- [20] Melanie Swan. *Blockchain: Blueprint for a New Economy*. First edition. OCLC: ocn898924255. Beijing : Sebastopol, CA: O'Reilly, 2015. 130 S. ISBN: 978-1-4919-2049-7.
- [21] Elyes Ben Hamida u. a. "Blockchain for Enterprise: Overview, Opportunities and Challenges". In: *The Thirteenth International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC 2017)*. Nice, France, Juli 2017. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01591859> (besucht am 08.11.2017).
- [22] Vincent Gramoli. "On the Danger of Private Blockchains". In: *Workshop on Distributed Cryptocurrencies and Consensus Ledgers (DCCL'16)*. 2016.
- [23] S. Pongnumkul, C. Siripanpornchana und S. Thajchayapong. "Performance Analysis of Private Blockchain Platforms in Varying Workloads". In: *2017 26th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*. 2017 26th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN). Juli 2017, S. 1–6. DOI: 10.1109/ICCCN.2017.8038517.
- [24] Wenting Li u. a. "Towards Scalable and Private Industrial Blockchains". In: *Proceedings of the ACM Workshop on Blockchain, Cryptocurrencies and Contracts*. BCC '17. New York, NY, USA: ACM, 2017, S. 9–14. ISBN: 978-1-4503-4974-1. DOI: 10.1145/3055518.3055531. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/3055518.3055531> (besucht am 08.11.2017).

- [25] Don Tapscott und Alex Tapscott. *Die Blockchain-Revolution: Wie die Technologie hinter Bitcoin nicht nur das Finanzsystem, sondern die ganze Welt verändert*. 1. Aufl. Kulmbach: Plassen Verlag, 26. Okt. 2016. 440 S. ISBN: 978-3-86470-388-1.
- [26] Amy Castor. *An Ethereum Voting Scheme That Doesn't Give Away Your Vote*. 6. Apr. 2017. URL: <https://www.coindesk.com/voting-scheme-ethereum-doesnt-give-away-vote/> (besucht am 04.01.2018).
- [27] Winfried Krieger. *Supply Chain Management - Definition*. URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/supply-chain-management-scm.html> (besucht am 04.01.2018).
- [28] Danny Dig und Ralph Johnson. "How Do APIs Evolve? A Story of Refactoring". In: *Journal of Software: Evolution and Process* 18.2 (2006), S. 83–107.
- [29] Future Flux Festival. *Blockchain Bikes*. URL: <http://futurefluxfestival.nl/en/program/blockchain-bikes/> (besucht am 05.01.2018).
- [30] Andreas Fischer. *Das IoT in Der Blockchain*. URL: <https://www.com-magazin.de/praxis/internet-dinge/iot-in-blockchain-1228562.html> (besucht am 05.01.2018).
- [31] Steven Buchko. *How Long Do Bitcoin Transactions Take?* 12. Dez. 2017. URL: <https://coincentral.com/how-long-do-bitcoin-transfers-take/> (besucht am 08.01.2018).
- [32] van der Meulen Rob. *Gartner Says 6.4 Billion Connected "Things" Will Be in Use in 2016, Up 30 Percent From 2015*. 10. Nov. 2015. URL: <https://www.gartner.com/newsroom/id/3165317> (besucht am 30.01.2018).
- [33] Digiconomist. *Bitcoin Energy Consumption Index*. URL: <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption> (besucht am 08.01.2018).
- [34] Kasey Panetta. *Top Trends in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2017*. 15. Aug. 2017. URL: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017/> (besucht am 30.01.2018).
- [35] Ann Forni Amy. *Gartner's 2016 Hype Cycle for Emerging Technologies Identifies Three Key Trends That Organizations Must Track to Gain Competitive Advantage*. 16. Aug. 2016. URL: <https://www.gartner.com/newsroom/id/3412017> (besucht am 30.01.2018).
- [36] Google. *Blockchain - Google Trends*. 30. Jan. 18. URL: [/trends/explore](https://trends.google.com/trends/explore) (besucht am 30.01.2018).
- [37] BlockchainHub. *Blockchains & Distributed Ledger Technologies*. URL: <https://blockchainhub.net/blockchains-and-distributed-ledger-technologies-in-general/> (besucht am 09.01.2018).
- [38] Danny de Boer. *AXA nutzt Ethereum-Blockchain für Flugversicherung*. 14. Sep. 2017. URL: <https://www.btc-echo.de/axa-nutzt-ethereum-blockchain-fuer-flugversicherung/> (besucht am 30.01.2018).

- [39] Mattias Scherer. *Performance and Scalability of Blockchain Networks and Smart Contracts*. 2017. URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:umu:diva-136470> (besucht am 05.01.2018).
- [40] Marko Vukolić. “Rethinking Permissioned Blockchains”. In: ACM Press, 2017, S. 3–7. ISBN: 978-1-4503-4974-1. DOI: 10.1145/3055518.3055526. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=3055518.3055526> (besucht am 08.11.2017).
- [41] Sirajd Raval. *Decentralized Applications: Harnessing Bitcoin’s Blockchain Technology*. O’Reilly Media, Inc., 2016.
- [42] Jagdeep Sidhu. “Syscoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System with Blockchain-Based Services for E-Business”. In: *Computer Communication and Networks (ICCCN), 2017 26th International Conference On*. IEEE, 2017, S. 1–6.
- [43] John Soldatos. *What Does Blockchain Technology Have to Do with Enterprise Maintenance Activities?* Juni 2017. URL: <https://www.solufy.com/blog/what-does-blockchain-technology-have-to-do-with-enterprise-maintenance-activities> (besucht am 08.01.2018).
- [44] Patrick Götze. *Lufthansa Industry Solutions - Mit Blockchain Zu Mehr Transparenz in Der Luftfahrt*. URL: <https://www.lufthansa-industry-solutions.com/de-de/loesungen-produkte/luftfahrt/mit-blockchain-zu-mehr-transparenz-in-der-luftfahrt/> (besucht am 09.01.2018).
- [45] Bitcoin Team. *Scalability - Bitcoin Wiki*. URL: <https://en.bitcoin.it/wiki/Scalability> (besucht am 08.01.2018).
- [46] Bitcoin.com Team. *Bitcoin Transaction Size*. URL: <https://charts.bitcoin.com/chart/transaction-size> (besucht am 31.01.2018).
- [47] Blockchain (Unternehmen). *Unbestätigte Transaktionen - Bitcoin Blockchain Charts*. URL: <https://blockchain.info/de/unconfirmed-transactions> (besucht am 10.01.2018).
- [48] Yonatan Sompolinsky und Aviv Zohar. *Accelerating Bitcoin’s Transaction Processing. Fast Money Grows on Trees, Not Chains*. 881. 2013. URL: <http://eprint.iacr.org/2013/881> (besucht am 12.01.2018).
- [49] Vitalik Buterin. *Toward a 12-Second Block Time*. 11. Juli 2014. URL: <https://blog.ethereum.org/2014/07/11/toward-a-12-second-block-time/> (besucht am 12.01.2018).
- [50] Hyperledger Fabric Team. *Hyperledger Fabric - Releases*. 18. Jan. 2018. URL: <https://github.com/hyperledger/fabric> (besucht am 18.01.2018).
- [51] Chris Mitchell. *Trusted Computing*. IET, 2005. 336 S. ISBN: 978-0-86341-525-8.
- [52] Lin Chen u. a. “On Security Analysis of Proof-of-Elapsed-Time (PoET)”. In: *International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems*. Springer, 2017, S. 282–297.

- [53] Gideon Greenspan. *MultiChain Private Blockchain - White Paper*. 2015. URL: <https://www.multichain.com/download/MultiChain-White-Paper.pdf> (besucht am 17.01.2018).
- [54] Christian Cachin und Marko Vukolić. “Blockchain Consensus Protocols in the Wild”. In: (6. Juli 2017). arXiv: 1707.01873 [cs]. URL: <http://arxiv.org/abs/1707.01873> (besucht am 08.11.2017).
- [55] Marko Vukolić. “The Quest for Scalable Blockchain Fabric: Proof-of-Work vs. BFT Replication”. In: *International Workshop on Open Problems in Network Security*. Springer, 2015, S. 112–125.
- [56] Kyle Croman u. a. “On Scaling Decentralized Blockchains”. In: *Financial Cryptography and Data Security*. International Conference on Financial Cryptography and Data Security. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, Heidelberg, 26. Feb. 2016, S. 106–125. ISBN: 978-3-662-53356-7 978-3-662-53357-4. DOI: 10.1007/978-3-662-53357-4_8. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-53357-4_8 (besucht am 27.12.2017).
- [57] Tendermint Team. *Tendermint - Github Repository*. 17. Jan. 2018. URL: <https://github.com/tendermint/tendermint> (besucht am 17.01.2018).
- [58] Jae Kwon. “Tendermint: Consensus without Mining”. In: *Draft v. 0.6, fall* (2014).
- [59] Ethan Buchman. “Tendermint: Byzantine Fault Tolerance in the Age of Blockchains”. PhD Thesis. 2016.
- [60] Quorum Team. *Transaction Processing - Quorum Wiki*. 17. Jan. 2018. URL: <https://github.com/jpmorganchase/quorum> (besucht am 17.01.2018).
- [61] Blockchain (Unternehmen). *Blockchain Size - Bitcoin Blockchain Charts*. URL: <https://blockchain.info/blocks-size> (besucht am 17.01.2018).
- [62] Hyperledger Fabric Team. *Support - Hyperledger Fabric Documentation*. URL: <https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/release/questions.html> (besucht am 18.01.2018).
- [63] Hyperledger Burrow Team. *Hyperledger Burrow - GitHub Repository*. 17. Jan. 2018. URL: <https://github.com/hyperledger/burrow> (besucht am 18.01.2018).
- [64] Hyperledger Fabric Team. *Chaincode - Hyperledger Fabric Documentation*. URL: <https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/release/chaincode.html> (besucht am 18.01.2018).
- [65] Hyperledger Fabric Team. *CA - Hyperledger Fabric Documentation*. URL: <http://hyperledger-fabric-ca.readthedocs.io/en/latest/users-guide.html#overview> (besucht am 18.01.2018).

- [66] Hyperledger Fabric Team. *SDKs - Hyperledger Fabric Documentation*. URL: <https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/release/fabric-sdks.html> (besucht am 18.01.2018).
- [67] Hyperledger Composer Team. *Introduction - Hyperledger Composer*. URL: <https://hyperledger.github.io/composer/introduction/introduction.html> (besucht am 08.11.2017).
- [68] Hyperledger Composer Team. *Hyperledger Composer - Releases*. 19. Jan. 2018. URL: <https://github.com/hyperledger/composer> (besucht am 19.01.2018).
- [69] Vagrant Team. *Vagrant by HashiCorp*. URL: <https://www.vagrantup.com/index.html> (besucht am 20.01.2018).
- [70] Hyperledger Composer Team. *Development Environment - Hyperledger Composer*. URL: <https://hyperledger.github.io/composer/installing/development-tools.html> (besucht am 20.01.2018).
- [71] Hyperledger Composer Team. *Developer Tutorial - Hyperledger Composer*. URL: <https://hyperledger.github.io/composer/tutorials/developer-tutorial> (besucht am 19.01.2018).
- [72] Hyperledger Composer Team. *Modeling Language - Hyperledger Composer*. URL: https://hyperledger.github.io/composer/reference/cto_language.html (besucht am 19.01.2018).
- [73] Hyperledger Composer Team. *Participants and Identities | Hyperledger Composer*. URL: <https://hyperledger.github.io/composer/managing/participantsandidentities> (besucht am 19.01.2018).
- [74] Hyperledger Composer Team. *Emitting Events - Hyperledger Composer*. URL: <https://hyperledger.github.io/composer/business-network/publishing-events.html> (besucht am 31.01.2018).
- [75] Hyperledger Composer Team. *REST API - Hyperledger Composer*. URL: <https://hyperledger.github.io/composer/integrating/getting-started-rest-api.html> (besucht am 20.01.2018).
- [76] Node Serialport Team. *Node-Serialport - Github Repository*. 18. Jan. 2018. URL: <https://github.com/node-serialport/node-serialport> (besucht am 20.01.2018).
- [77] IBM Silvergate Team. *Netcomposer - Github Repository*. 5. Jan. 2018. URL: <https://github.com/ibm-silvergate/netcomposer> (besucht am 20.01.2018).
- [78] Docker Team. *What Is a Container*. 29. Jan. 2017. URL: <https://www.docker.com/what-container> (besucht am 21.01.2018).
- [79] Hyperledger Composer Team. *Multi Org Deployment - Hyperledger Composer*. URL: <https://hyperledger.github.io/composer/tutorials/deploy-to-fabric-multi-org.html> (besucht am 21.01.2018).

- [80] Hyperledger Fabric Team. *Pluggable Consensus Implementations - Hyperledger Fabric Documentation*. URL: <http://hyperledgerdocs.readthedocs.io/en/latest/pluggableos.html?highlight=Ordering%20Service> (besucht am 20.01.2018).
- [81] Hyperledger Blockchain Explorer Team. *Hyperledger Blockchain Explorer - GitHub Repository*. 21. Jan. 2018. URL: <https://github.com/hyperledger/blockchain-explorer> (besucht am 21.01.2018).
- [82] Davide Carboni. “Feedback Based Reputation on Top of the Bitcoin Blockchain”. In: (5. Feb. 2015). arXiv: 1502.01504 [cs]. URL: <http://arxiv.org/abs/1502.01504> (besucht am 09.01.2018).
- [83] Richard Dennis und Gareth Owen. “Rep on the Block: A next Generation Reputation System Based on the Blockchain”. In: *Internet Technology and Secured Transactions (ICITST), 2015 10th International Conference For*. IEEE, 2015, S. 131–138.