

Transaktionen

Ture ClauSSen, 1531067, `ture.claussen@stud.hs-hannover.de` und Jannes
Neemann, 1530893, `jannes.neemann@stud.hs-hannover.de`

Fakultät IV, Abteilung Informatik, Hochschule Hannover, Ricklinger Stadtweg 120,
30459 Hannover

Zusammenfassung. Schlüsselwörter:

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	2
2	Struktur und technische Umsetzung einer Transaktion	3
2.1	Komponenten einer Transaktion	3
2.2	Typen von Transaktionen	3
2.3	Serialisierung	4
3	Aufbau einer Transaktion	5
3.1	Nonce	5
3.2	Gas	6
3.3	Value und Data	9
3.4	Signatur	10
4	Transaktionsabwicklung	11
4.1	Propagation	11
4.2	Speicherung	11
5	Ausblick	11

1 Einführung

Das Wort Transaktion stammt von dem lateinischen Wort *transigere* ab, welches im übertragenden Sinne mit 'durchführen', 'vollführen' oder 'abmachen' (Geschäft) übersetzt werden kann. [1] Dieser Wortsinn besteht auch weiterhin im technischen und wirtschaftlichen Bereich, jedoch gibt es noch spezifischere Abgrenzungen. In der Wirtschaft ist es ein Vorgang bei dem Waren und Forderungen ausgetauscht werden. [6, S. 18 f.] In der Informatik ist es im Zusammenhang mit Datenbanken eine unteilbare, *atomare*, Abfolge von Anweisungen, die einen Übergang von einem konsistenten Zustand in einen Anderen beschreibt. [7, S.520]

Ethereum ist ein "transaktionsbasierter Automat" (*transaction-based state machine*). Somit sind Transaktionen ein grundlegender Baustein von Ethereum im Allgemeinen und ihnen kommt eine ähnliche Bedeutung wie ACID Transaktionen bei. Der Automat speichert seinen Zustand σ_t in der Blockchain, eine Transaktion T ist Argument der Zugstandsübergangsfunktion Υ , die von *externen Akteuren (EA)* angestoßen wird und diesen gespeicherten Zustand σ_t in einen neuen, gültigen Zustand σ_{t+1} überführen soll: $\sigma_{t+1} = \Upsilon(T, \sigma_t)$. Im Falle eines Konsens des Netzwerkes wird diese Zustandsveränderung durchgeführt beziehungsweise gespeichert.

Im Kontrast zu Kryptowährungen wie Bitcoin ist der Umfang des Automaten bzw. des Protokolls bei Ethereum deutlich geweitet, denn Zweck ist nicht nur die Schöpfung, Speicherung und der Austausch eines digitalen Zahlungsmittels [9], sondern eine allgemeine dezentrale Rechenmaschine, ein "Weltcomputer". [13, S. 1-4]

Im Folgenden betrachten wir eine beispielhafte Transaktion T_x , anhand derer wir die technischen und konzeptionellen Spezifikationen von Transaktionen in Ethereum erläutern werden.

2 Struktur und technische Umsetzung einer Transaktion

Die Komponenten welche eine Transaktion in Ethereum ausmachen sind vergleichbar mit denen eines Briefes. Sie besitzen einen Empfänger sowie eine Frankierung, welche die Transportkosten zum Empfänger bezahlen. In einen Brief kann man z.B. Geld oder einen Text verschicken. Auch Transaktionen in Ethereum können Geld in Form von Ether und einen Text in Form von Nutzdaten verschicken. Im Weiteren wird die allgemeine Struktur und technische Umsetzung einer Transaktion vorgestellt.

2.1 Komponenten einer Transaktion

Transaktionen enthalten laut ihrer offiziellen Definition [13, S. 4] folgende Datenfelder:

- nonce:** Ein Skalar welcher gleich der Anzahl der vom EOA versendeten Transaktionen ist. Der Nutzen wird in 3.1 erläutert.
- gasPrice:** Ein Skalar der angibt, wie viel Wei man pro Einheit *Gas* bezahlt, die bei der Gesamtheit aller Berechnungen die während der Ausführung der Transaktion anfallen (S. 3.2)
- gasLimit:** Ein Skalar der die maximal Anzahl an *Gas* angibt, die während der Ausführung der Transaktion verbraucht werden darf. Dieser Betrag muss im Voraus bezahlt werden.
- to:** Die 160-Bit Adresse des Empfängers.
- value:** Skalar der die Menge Wei angibt, die der Empfänger erhält.
- v,r,s:** Komponenten der ECDSA-Signatur (S. 3.4), um den Sender der Transaktion zu bestimmen
- init:** Ein Byte-Array unbegrenzter Länge, welches nur bei einer Kontrakterzeugung verwendet wird und den kompilierten Sourcecode des Kontrakts enthält
- data:** Ein Byte-Array unbegrenzter Länge, welches die Nutzdaten des Kontrakts enthält

2.2 Typen von Transaktionen

Es gibt genau zwei Typen von Transaktion. Transaktionen die eine Nachricht von einem Account¹ zu einem anderen überträgt („message calls“ [13, S. 4]) oder Transaktionen die einen neuen Kontrakt erzeugen („contract creation“ [13, S. 4])). Mit Nachricht ist dabei der Inhalt von den Feldern *value* und *data* gemeint.

Bei message call Transaktionen enthält das *to* Feld die öffentliche Adresse eines EOA oder eines Kontrakts. Zusätzlich besteht die Option *value* und *data*

¹ Mit Account ist hier ein EOA oder ein Kontrakt gemeint

zusetzen. Speziell ist das *data* Feld von Bedeutung, wenn das Transaktionsziel ein Kontrakt ist, denn in diesem Feld wird der konkrete Funktionsaufruf in Bytecode gespeichert und wird von dem Kontrakt ausgeführt.

Die Besonderheit bei contract creation Transaktionen ist, dass die Empfängeradresse die Nulladresse (*0x0*) ist. Diese Adresse ist keinem Account zugewiesen und dient ausschließlich als „kontrakterzeugungs Adresse“ [3].

Ein spezieller Typ von Transaktion ist eine interne Transaktion. Diese treten nur ausgehend von einem Kontrakt auf. Sie werden auch nicht in der Blockchain aufgefasst. Somit kann eine Transaktion die an einen Kontrakt gerichtet ist, eine Funktion aufrufen, welche dem Sender einen Etherbetrag zurücksendet. Diese eigentlich Transaktion wird als interne Transaktion gewertet und nur der Funktionsaufruf wird in der Blockchain dokumentiert.

2.3 Serialisierung

Da Ethereum ein Weltcomputer ist und Daten somit über die ganze Welt verschickt werden, müssen diese kompakt, effizient und einheitlich verschickt werden. Dabei wird das Kodierungsverfahren *Recursive Length Prefix (RLP)* verwendet. Alle serialisierten Daten in Ethereum sind Listen von Bytes [13, S. 3]. Auch die Daten einer Transaktion werden mit Hilfe von RLP in eine Liste von Bytes serialisiert und wieder deserialisiert. Bei der RLP Kodierung handelt es sich nur um ein Verfahren um Struktur zu serialisieren. Das heißt die Methode nimmt nur ein so genanntes „Item“ als Parameter entgegen. Dieses Item ist entweder ein String, welcher in ein Byte-Array konvertiert wird, oder eine Liste von Items. Relevant ist für die Methode nur die Länge des Items. Je nach Fall werden dabei unterschiedliche Regeln definiert:

1. Item ist eine Zeichenkette (Byte-Array):
 - Besteht dieses nur aus einem Byte mit einem Wert kleiner als 128 (*0x7f*), ist das Byte ihre eigene RLP Repräsentation
 - Enthält das Byte-Array weniger als 56 Byte, ist die RLP Repräsentation der Inhalt dieses mit einem Präfix von *0x80* (128) plus die Länge des Arrays. Beispiel: „Ethereum“ \Rightarrow [*0x85*, 'E', 't', 'h', 'e', 'r'] bzw. mit ASCII Kodierung: [*0x85*, *0x45*, *0x74*, *0x68*, *0x65*, *0x72*]
 - Ist das Byte-Array größer als 55 Byte wird ein Präfix aus mehreren Bestandteilen verwendet. Zum einen *0xb7* plus die Anzahl der Bytes die benötigt werden, um die Länge des String darzustellen. Gefolgt von der Länge des Strings im Big-Endian Format und dem Inhalt des Byte-Arrays. So ergibt sich für ein 2048-Byte langes Byte-Array folgender Präfix: [*0xb9*, *0x80*, *0x00*]. 2048 entsprechen in Hexadezimal *0x800* somit werden zwei Bytes (*0x80* und *0x00*) benötigt, um die Länge des Bytes darzustellen. Somit erhalten wir $0xb7 + 2 = 0xb9$.
2. Item ist eine (verschachtelte) Liste von Items:
 - Ist die Gesamtlänge alle in der Liste enthaltenen Items mit ihrer jeweiligen RLP Repräsentation 0-55 Bytes lang, so wird der Präfix *0xc0*

- plus die Länge der konkatenierten Liste der RLP Repräsentation gesetzt. Anschließend folgt die Liste selbst. So wäre die Kodierung der Liste [„Ether“, „Wei“] [0xca, 0x85, 'E', 't', 'h', 'e', 'r', 0x83, 'W', 'e', 'i'] bzw. inklusive ASCII-Kodierung [0xca, 0x85, 0x45, 0x74, 0x68, 0x65, 0x72, 0x83, 0x57, 0x65, 0x69]. Das zweite bis siebte Byte ist dabei die RLP Repräsentation von „Ether“ und die Bytes acht bis elf die von „Wei“. Somit ergibt sich eine Länge von 10 Byte, somit lautet der Präfix 0xca
- Ab einer Gesamtlänge von 56 Bytes wird der Präfix 0x7f plus die Anzahl der Bytes die benötigt werden, um die Länge der Liste darzustellen. Danach folgt die Länge der Liste mit der konkatenierten Liste von RLP Repräsentation

Das Item darf nicht länger als 2^{64} Bytes sein, da sonst die Länge des Präfix in allen Fällen länger als 255 ist und somit nicht in einem Byte dargestellt werden kann.

3 Aufbau einer Transaktion

3.1 Nonce

Die Nonce wurde nicht von Ethereum eingeführt, sondern kommt aus dem Bereich der Kryptographie. Eine Nonce ist dort laut Definition eine willkürliche Nummer, die nur einmal in einer kryptographischen Kommunikation verwendet wird. Dabei handelt es sich meistens um eine zufällig oder pseudo-zufällig generierte Zahl. Mit der die Einmaligkeit der Kommunikation gesichert wird.

In Ethereum-Transaktionen ist die Nonce eine Zahl, welche bei der Accounterstellung den Wert Null hat und bei jeder erfolgreichen Transaktion² um eins inkrementiert wird. Dieser Wert wird dabei nicht explizit im Account in der Blockchain gespeichert, sondern dynamisch, indem die Anzahl der erfolgreichen Transaktionen gespeichert wird [3, S.101].

Mit der Nonce werden sogenannte "Replay attacks" verhindert. Im Rahmen von Ethereum gesprochen wird so verhindert, dass die selbe Transaktion mehrmals ausgeführt werden kann. Da Transaktionen in der Blockchain gespeichert werden und alle Daten zu dieser Transaktion eingesehen werden können, wäre es ohne die Nonce möglich, dass eine Unbeteiligter der Transaktion diese unbegrenzt oft wiederholen kann, ohne die Zustimmung des Absenders zu haben. Da die Transaktion jedoch schon einmal abgeschlossen ist, entspricht die des Absenders nicht mehr der der Transaktion, somit kann die Transaktion nicht wiederholt werden. Das gleiche gilt, wenn der Absender die Transaktion wiederholen möchte.

Des Weiteren dient die Nonce auch der Transaktionsabwicklung innerhalb des Netzwerks. Werden mehrere Transaktionen von einem Account versendet, kommen diese meistens in unterschiedlicher Reihenfolge bei den Nodes an. So

² Eine Transaktion ist erfolgreich, wenn sie in einem Block der Blockchain aufgenommen wurde

ist nicht sichergestellt, dass eine Transaktion die eine höhere Priorität hat, auch als erste verarbeitet wird. Mit der Nonce kann dies jedoch realisiert werden. So vergleicht das Netzwerk die Nonce, die mit der Transaktion gesendet wird, mit der Nonce des Account. Stimmen diese überein, so wird die Transaktion sofort verarbeitet. Ist die Nonce der Transaktion grösser als die erwartet, landet die Transaktion im *Mempool*, in der sich alle noch nicht verarbeiteten Transaktionen befinden. Ist die Nonce des Accounts zum Beispiel 2 und die der Transaktion 5, so geht der Node davon aus, dass die Transaktionen mit den noch fehlenden Noncen sich verspäten. Somit bleibt die Transaktion solange im Pool, bis die Transaktion mit den Nonce 2, 3 und 4 im Netzwerk registriert wurden. Somit kann eine Priorisierung von Transaktionen durch eine in der Priorität absteigende Transaktionsreihenfolge sichergestellt werden.

3.2 Gas

Gas ist ein zentraler konzeptioneller Lösungsansatz im Rahmen von Ethereum. Da Ethereum turing-vollständig ist [13, S. 1], ergibt sich unter anderem das sogenannte "Halteproblem". Dieses besagt, dass im Voraus nicht vorhergesagt werden kann, ob das Programm einer Turing-Maschine jemals zu einem Ende kommt. [5, S.70] Um die Funktionalität des Netzwerks zu gewährleisten, wird die Laufzeit einer jeden Zustandsveränderung der Blockchain, sprich Transaktion, durch Gas begrenzt.

Gas ist eine eigenständige Währung innerhalb von Ethereum, dessen Einheit einen Rechenschritt in der EVM bemisst [8, S. 9:3], wobei für jeden Opcode die Kosten in Gas spezifiziert werden. [13, S. 25 ff.] Gas ist also eine Gebühr für Rechenaufwand. Zusätzlich werden auch Kosten für die Nutzung von persistentem Speicher miteinbezogen. Es gilt sogar das Inverse: Wird durch eine Transaktion persistenter Speicher freigegeben, werden Rabatte gewährt.

Die maximale Gebühr einer Transaktion wird durch die Kombination der Datenfelder *gasPrice* und *gasLimit* angegeben. Die resultierende Gebühr $gasPrice \times gasLimit$ wird bei Erstellung der Transaktion in voller Höhe vom Konto abgezogen. Nach Bestätigung der Transaktion wird nicht genutztes Gas zu dem angegebenen Preis in Ethereum zurückerstattet.

Somit gilt es nun im Voraus abzuschätzen wie hoch der Rechenaufwand für unsere Beispieltransaktion T_x sein wird. Je mehr Ressourcen des Weltcomputers sie in Anspruch nimmt, desto höher die Gebühr. Gerade wegen des Halteproblems kann dies aber nur grob vorgenommen werden, eine robuste Programmierung von *Smart Contracts* ist essentiell. Ein erster Anhaltspunkt dafür sind zunächst die intrinsischen Kosten einer Transaktion. Das ist der Overhead der allein durch die Transaktion und deren Inhalt besteht. Diese intrinsischen Kosten g_0 lassen sich mit auf Basis folgender Grundlage berechnen.

$$g_0 \equiv \sum_{i \in T_i, T_d} \begin{cases} G_{datazero} & \text{if } i = 0 \\ G_{txdataanonzero} & \text{otherwise} \end{cases} + \begin{cases} G_{txcreate} & \text{if } T_t = \emptyset \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} + G_{transaction}$$

Also steigen die Kosten einer Transaktion mit der Grösse des Feldes *data* an und $G_{transaction}$ bestimmt den Basiswert an Gas für eine Transaktion, welcher sich im Jahr 2020 auf 21000 beläuft. Generell sollte das *gasLimit* tendenziell zu hoch angelegt sein, da Transaktionen mit unzureichendem Gas einfach abgebrochen werden (*out-of-gas Exception*). In diesem Fall wird keine der begonnenen Veränderungen am Zustand gespeichert. Durch Einsetzen für g_0 ergeben sich für die Beispieltransaktion T_x intrinsische Kosten von: X TODO calculate

Preis und Latenz Gas kann bewusst nur mit Ether erworben werden, da die Gas-Preise möglichst unabhängig von den Preisschwankungen (von Ether) sein sollen. Der *gasPrice* kann frei gesetzt werden, auch ein Wert von 0 ist gültig. Ein Richtwert für den Wert lässt sich durch Werkzeuge wie ETH Gas Station ermitteln, welche vergangene Transaktionen im *Ledger* betrachten und daraus Richtwerte ermitteln. Für die T_x empfiehlt sich ein *gasPrice* von 9GWei laut ETH Gas Station, am 20.04.2020 akzeptieren 84% der letzten 200 Blöcke diesen Preis, sodass sich für unsere Transaktion Kosten in Höhe von TODO CALC $\times 9\text{Gwei} = X$ ergeben.

Dort wird auch ein Umstand kenntlich, denn die Höhe des Gas-Preises scheint massgeblich über die Latenz zu entscheiden, also die Zeit bzw. Zahl der Blöcke zwischen Veröffentlichung einer Transaktion und ihrer Inkludierung in einem Block. Übersteigt der *gasPrice* das Mittel der anderen Transaktionen im *mem-pool* so steigt die Wahrscheinlichkeit in nächsten Block bearbeitet zu werden. Diese Korrelation schwindet allerdings, sobald die Durchsatzfähigkeit des Netzwerkes erreicht ist.

Zusätzlich kann das *gasLimit* H_1 eines Blocks nur durch die Miner nach erfolgreichem Schürfen eines Blockes um maximal $\frac{P(H)_{H1}}{1024}$ des alten Limits $P(H)_{H1}$ erhöht oder verringert werden. Dies soll eine Zentralisierung der Rechenleistung auf wenige, grosse Miner verhindern. Gleichzeitig limitiert dies die Fähigkeit viele Transaktionen in einem kurzen Zeitintervall zu verarbeiten.

Unter Betrachtung aller Transaktionen im Zeitraum vom 01.03.2020 00:00:17 UTC (Block 9581792) bis 31.03.2020 23:59:57 UTC (Block 9782601) mit dem Python Werkzeug *ethereum-etl* [2] ergibt sich aktuell folgender durchschnittlicher Durchsatz T_{max} pro Block: [10]

$$T_{max} = \frac{blockGasLimit}{transactionMedianGas} = \frac{9817880}{80000} = 122.72$$

Bei kurzzeitig stark erhöhter Anzahl an Transaktionen wie beispielsweise bei einem *ICO* (*initial coin offering*), werden teilweise um ein vielfaches höhere Transaktionskosten gezahlt, um möglichst schnellen Zugriff auf die Wertanlagen zu erhalten. [8, S. 9:6 f.] Im Betrachteten Zeitraum war dies zum Beispiel am 13.03.2020 der Fall (s. 1). Zu diesem Zeitpunkt wurde teilweise 800 GWei pro Einheit Gas gezahlt. Der Angriff ist zeitlich stark mit einem *DOS-Angriff* auf die Börse Bitmex korreliert. Ob dies tatsächlich die Ursache für den extremen Anstieg der Netzwerkaktivität ist, wird allerdings im folgenden nicht weiter analysiert. [4]

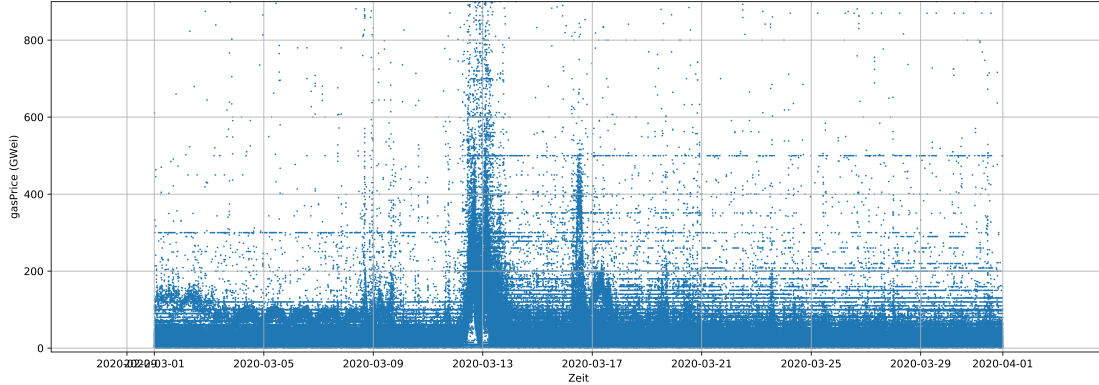


Abb. 1. gasPrice nach Tag im Monat März [10]

Bei Betrachtung der Verteilung der Anzahl Transaktionen pro Block 2 zeigt sich ein weiteres Problem. Zunächst verteilt sich das Gros der Transaktionen ungefähr um den zuvor berechneten Durchschnitt T_{max} . Jedoch gibt es einen beträchtlichen Anteil an Transaktionen, der fast keine oder sehr wenige Transaktionen enthalten und gleichzeitig nur einen Bruchteil des *blockGasLimit* ausschöpfen. Es können mehrere Vermutungen angestellt werden, wo der Grund dafür liegt.

Alle Miner stehen unter einem wirtschaftlichen Druck. Es werden beträchtliche Ressourcen investiert, eine Auszahlung der aufgewendeten Rechenleistung gibt es nur, wenn ein Block erfolgreich geschürft wird. Wenn die Lösung für den nächsten Block gefunden wurde, muss diese noch über das Netzwerk an die anderen Nodes veröffentlicht werden. Je mehr Transaktionen im Block vom Miner gespeichert werden, desto länger dauert die Verifizierung der Transaktionen. Beim sogenannten *SPV-Minig* wird sogar komplett auf die Verifizierung verzichtet. [12] Hier erhöhen mehr Transaktionen die Gefahr eines *double-spend* und die Ungültigkeit des Blockes. Außerdem verbrauchen mehr Transaktionen mehr Speicher (ergo Bandbreite) benötigt der Block. [11]

Alle Vermutungen deuten in die gleiche Richtung: Je mehr Zeit verbraucht wird, steigt proportional dazu das Risiko, dass keine Belohnung ausgezahlt wird, da ein anderer Miner seine Lösung schneller veröffentlicht.

Anreiz und Spieltheorie Beide Probleme lassen sich auf das Anreizsystem von Ethereum zurückführen. Generell stellt sich für die Teilnehmer des Netzwerkes die Frage

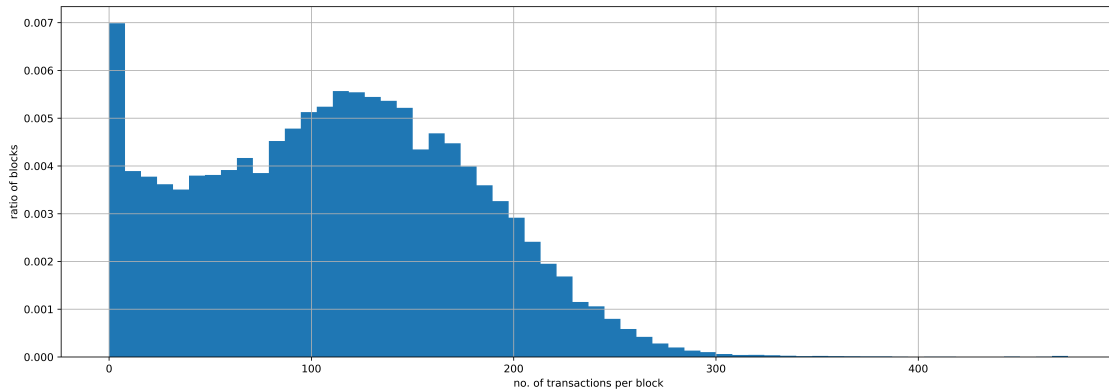


Abb. 2. Verteilung der Zahl an Transaktionen pro Block (60 konstante Klassen) [10]

3.3 Value und Data

Wie in 2.1 schon vorgestellt, enthalten das *value*- und *data*-Feld die eigentliche Nutzlast einer Transaktion. Dabei enthält das *value*-Feld ausschliesslich den Betrag an Wei, der an die Empfängeradresse gesendet werden soll und das *data*-Feld enthält die Nachricht. Eine Transaktion die ein *value*-Feld enthält, wird dabei auch Zahlung bzw. *payment* genannt. Das *data*-Feld ist ein Aufruf bzw. *invocation* [3, S.108]. Eine Zahlung zwischen zwei EOAs ist dabei eine einfache Zustandsänderung der EVM und Übertragung des Wei Betrags auf den empfangenden Account. Enthält diese Transaktion Daten im *data*-Feld so wird diese von der Blockchain ignoriert [13, S.10]. So werden diese auch von der eigenen Wallet ignoriert und nur angezeigt. Relevant wird der Inhalt, wenn es sich bei der

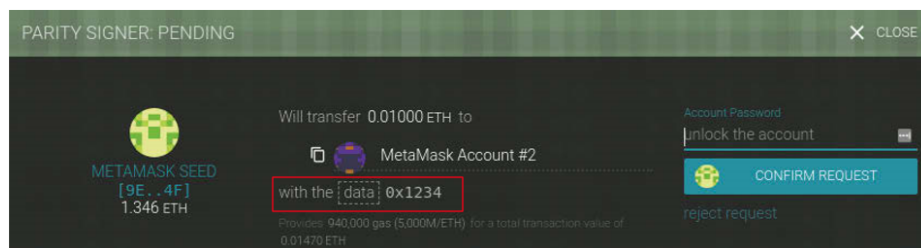


Abb. 3. Beispieltransaktion an EOA mit gefülltem *data*-Feld [3, S.109]

to Adresse um einen Kontrakt handelt. Der Inhalt wird dann von der EVM als ein Funktionsaufruf interpretiert. Ein Kontrakt enthält beispielsweise folgende Funktion:

Diese Funktion ist Teil eines Token-Kontrakt und gibt den Wert des übergebenen Weis in diesem Token zurück.

0xd4cab210b3a8e169e406b664e23e24c06965d9b622a884a0d74864771d67f5a8

[illegible]

```
0xd4cab210000000000000000000000000000000000000000000de0b6b3a7640000
```

Die letzte mögliche Kombination ist, wenn sowohl das *value*- und *data*-Feld leer sind. Dies ist ebenfalls eine gültige Transaktion würde. Diese erfüllt jedoch keinen besonderen Zweck außer der Verwendung des bezahlten Gas und somit nur einer Senkung des eigenen Kontostands.

ECDSA

³ Keccak-256 ist das am meisten genutzte Hashverfahren in Ethereum

Multisignaturen

4 Transaktionsabwicklung

4.1 Propagation

4.2 Speicherung

5 Ausblick

Literatur

1. Transigere - Translation from Latin into German | PONS.
<https://en.pons.com/translate/latin-german/transigere>
2. Blockchain-etl/ethereum-etl. Blockchain ETL (Apr 2020)
3. Antonopoulos, A.M., Wood, G.: Mastering Ethereum: building smart contracts and DApps. O'Reilly, Sebastopol, CA, first edition edn. (2019), oCLC: ocn967583559
4. BitMEX: DDoS attack, 13 March 2020 | BitMEX Blog
5. Davis, M.: Computability and Unsolvability. Courier Corporation (Apr 2013)
6. Ehrlicher, W.: Kompendium der Volkswirtschaftslehre. Vandenhoeck & Ruprecht (1975)
7. Herold, H., Lurz, B., Wohlrab, J., Hopf, M.: Grundlagen Der Informatik. Pearson, third edn. (2017)
8. M.Spain, M.Foley: OASICS-Tokenomics. Leibniz-Zentrum für Informatik, Dagstuhl Publishing, Germany (2019)
9. Nakamoto, S.: Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System
10. Neemann, J., Claussen, T.: Appendix: Scripts.
<https://github.com/campfireman/SEM-ethereum-transactions>
11. Research, B.: Empty Block Data by Mining Pool | BitMEX Blog.
<https://blog.bitmex.com/empty-block-data-by-mining-pool/>
12. Svanevik, A.: Why All These Empty Ethereum Blocks?
<https://medium.com/@ASvanevik/why-all-these-empty-ethereum-blocks-666acbbf002> (Oct 2018)
13. Wood, G.: Ethereum/yellowpaper. 2019-10-20 (Oct 2019)