



Nachhaltige Blockchains

—
Studie

Nachhaltige Blockchains

Studie

Disclaimer

Diese Studie wurde vom Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT nach bestem Wissen und unter Einhaltung der nötigen Sorgfalt erstellt. Fraunhofer FIT, seine gesetzlichen Vertreter und/oder Erfüllungsgehilfen übernehmen keinerlei Garantie dafür, dass die Inhalte dieses Whitepapers gesichert, vollständig für bestimmte Zwecke brauchbar oder in sonstiger Weise frei von Fehlern sind. Die Nutzung dieser Studie geschieht ausschließlich auf eigene Verantwortung. In keinem Fall haften das Fraunhofer FIT, seine gesetzlichen Vertreter und/oder Erfüllungsgehilfen für jegliche Schäden, seien sie mittelbar oder unmittelbar, die aus der Nutzung der Studie resultieren.

Bildquellen

© <https://unsplash.com/>

© <https://pixabay.com/>

Empfohlene Zitierweise

Radlinski, M.; Trauth, D.; Prinz, W. (2024): Nachhaltige Blockchains.
Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT.
<https://doi.org/10.24406/publica-3382>

Inhaltsverzeichnis

SPOTLIGHT	4
EXECUTIVE SUMMARY	6
EINLEITUNG	7
PROGRAMMIERBARE BLOCKCHAINS BLOCKCHAINS	8
NACHHALTIGKEIT UND IHRE BEDEUTUNG FÜR DIE BLOCKCHAIN	8
WAS BEDEUTET NACHHALTIGKEIT	8
KRITERIEN DER NACHHALTIGKEIT IN BEZUG ZU BLOCKCHAIN	8
Umwelt.....	9
Wirtschaft.....	9
Gesellschaft.....	9
UNTERSUCHTE BLOCKCHAINS	10
BLOCKCHAINS IM VERGLEICH	12
ENERGIEVERBRAUCH	12
TRANSAKTIONSKOSTEN	13
BENUTZERFREUNDLICHKEIT	13
SKALIERBARKEIT	15
SCHLUSSFOLGERUNG	16
REFERENZEN	18
ANHANG	23
AUTOR	26
EXPERTEN	26



Spotlight

»Die Blockchain-Technologie ist ein Baustein für das Internet der Zukunft.«

Blockchain-Strategie der Bundesregierung [99]

29 verschiedene Blockchains
auf Nachhaltigkeit untersucht

1214,65 kWh an Strom
verbraucht eine einzelne
Bitcoin Transaktion

Nur **$1,883 \cdot 10^{-9}$ kWh**
an Strom verbraucht die
stromeffizienteste Blockchain
pro Transaktion

0\$ Transaktionskosten
bei drei der untersuchten
Blockchains

Bis zu **160.000 Transaktionen**
die pro Sekunde
ausgeführt werden können



Executive Summary

»Die Digitalisierung hat den Wettbewerb grundlegend verändert: Nicht mehr nur herkömmliche Produkte stehen im Fokus, sondern digitale Geschäftsmodelle setzen jetzt den Maßstab. Die Blockchain Technologie kann hierbei eine entscheidende Rolle spielen.

Während web2-basierte Geschäftsmodelle sich durch ihre weltweite Verfügbarkeit und Individualität auszeichnen, erweitern web3-, also Blockchain basierte Geschäftsmodelle, das Konzept um direkte Investor Beziehungen. Kunden werden zu Partnern, zu Botschaftern, zu Investoren und das bequem von zuhause aus. Die Blockchain ist somit das Herzstück eines Web3 Geschäftsmodells es geht dabei um mehr als nur Kryptowährungen. Es ist daher von höchster Bedeutung zu verstehen, welchen Beitrag jede einzelne Blockchain leisten kann und welche Nachhaltigkeit damit verbunden ist. Denn web3 steht nicht nur für Digitalisierung, sondern auch für eine nachhaltige Zukunft.«

Dr. Daniel Trauth
Wissenschaftlicher Mitarbeiter beim
Fraunhofer-Institut
für Angewandte Informationstechnik FIT



Einleitung

Im Jahr 2019 galt laut der Studie »Nachhaltigkeit im Kontext der Blockchain-Technologie« [98] die deutsche Bundesregierung als eine der ersten Regierungen weltweit, welche sich mit der Frage der Nachhaltigkeit von Blockchain-Technologien befasst hat. Die Studie betont die Notwendigkeit einer nachhaltigen Nutzung von Blockchain-Technologien im Zusammenhang mit den Nachhaltigkeits- und Klimaschutzzielen der Regierung. Dabei wird hervorgehoben, dass nicht alle Blockchains ressourcen- und energieintensiv sind.

Ebenso zeichnet sich laut dem Whitepaper »Blockchain: Grundlagen, Anwendungen und Potenziale« [100] ein Trend ab: Die wachsende Popularität von dezentralen Systemen und die zunehmende Attraktivität programmierbarer Blockchains und sogenannten smart contracts. Diese Entwicklungen haben nicht nur das Interesse an digitalen Währungen geweckt, sondern auch das Angebot an verschiedenen Blockchain-Plattformen und deren Anwendungen in der Industrie und Alltag.

Die Bundesregierung bezeichnet in der Blockchain-Strategie der Bundesregierung Blockchain Technologien als einen »Baustein für das Internet der Zukunft« [99]. Mit diesem steigenden Interesse entstanden neue Innovationen in den Bereichen Konsensalgorithmen und deren Energieverbrauch, die direkte Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit dieser Technologien haben.

Angesichts dieser Entwicklungen ist es von entscheidender Bedeutung, einen genaueren Blick auf die Nachhaltigkeit von verschiedenen Blockchain-Technologien zu werfen. Diese Studie zielt darauf ab, die nachhaltigste Blockchain-Lösung zu identifizieren und ihre potenziellen Auswirkungen auf die Umwelt und die Gesellschaft zu analysieren. Darunter fallen Aspekte der Nachhaltigkeit, einschließlich Energieverbrauch, Skalierbarkeit und Benutzerfreundlichkeit.

Programmierbare Blockchains

Der Begriff programmierbare Blockchain wird verwendet, um eine spezielle Art von Blockchain zu beschreiben, welche die Erstellung und Ausführung von Programmen (smart contracts) mittels einer eigenen Programmiersprache ermöglicht. Ein Beispiel für solch eine Blockchain ist Ethereum, die zweitgrößte Blockchain nach Marktkapitalisierung [4]. Blockchains wie Bitcoin, welche primär entwickelt wurden, Transaktionen mit deren nativen Token zu speichern, fallen nicht unter diesen Begriff.

Angesichts des wachsenden Trends, programmierbare Blockchains in Geschäftsstrukturen zu integrieren und smart contracts sowie Daten auf verschiedene Blockchains zu laden, ist es von großem Interesse zu bewerten, welche dieser Blockchains die nachhaltigsten sind.

Nachhaltigkeit und ihre Bedeutung für die Blockchain

Laut dem Bitcoin Energy Consumption Index [1] verbraucht eine einfache Transaktion auf der Bitcoin Blockchain 1214,65 kWh an Strom. Dieser Index stellt den Stromverbrauch mit 791.421 Visa Transaktionen gleich. Bei diesem Verbrauch werden durch Bitcoin Miner 677,48 kg CO₂ an Emissionen freigesetzt. Ebenso liegen aktuelle Transaktionsgebühren zwischen 3\$ und 38\$ (US-Dollar) [2]. Diese Daten lassen sich mit den hohen Aktivitäten, der Größe des Netzwerkes und des Proof of Work (PoW) Konsensmechanismus begründen. Der Architekturaufbau und die aufwendige Peer-to-Peer-Kommunikation benötigen solche Energiemengen.

Im Verlaufe der letzten Jahre wurden immer mehr Blockchains entwickelt, welche auf anderen Algorithmen und Konsensmechanismen basieren und somit den Stromverbrauch, die CO₂ Emissionen als auch die Transaktionsgebühren im Vergleich zu Bitcoin reduzieren [101].

Ein häufig verwendeter Konsensmechanismus neben PoW ist Proof of Stake (PoS). Dieser zeichnet sich durch eine bessere Skalierbarkeit und Energie- und Kosteneffizienz aus. Ethereum ist ein Beispiel für die Umsetzung von Proof of Stake [101]. Aufgrund der Beliebtheit von Ethereum wurden viele weitere Blockchains Ethereum kompatibel aufgebaut. Dies bedeutet, dass Programme, welche auf Ethereum funktionieren, genauso auf diesen sogenannten Ethereum Virtual Machine (EVM) kompatiblen Blockchains laufen können [102]. In dieser Studie werden vor allem EVM-kompatible und einzelne etablierte Blockchains evaluiert. Vor dem Vergleich ist es notwendig, eine Klärung über die Definition von Nachhaltigkeit und deren Verhältnis zur Blockchain-Technologie zu untersuchen.

Was bedeutet Nachhaltigkeit?

Nachhaltigkeit bedeutet, die Bedürfnisse der gegenwärtigen Generation zu erfüllen, ohne zukünftige Generationen zu beeinträchtigen, ihre eigenen Bedürfnisse zu decken. Hierbei ist eine Balance zwischen Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft das Ziel, um langfristige Lebensqualität zu gewährleisten [103]. Das bezieht sich somit nicht nur auf eine Herabsetzung von potenziellen CO₂-Emissionen, sondern auch auf die Skalierbarkeit und Interaktionskosten von Blockchains.

Kriterien der Nachhaltigkeit in Bezug zu Blockchain

In der Untersuchung der Nachhaltigkeit programmierbarer Blockchains werden drei Hauptkriterien betrachtet: Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Blockchains werden sowohl von Unternehmen als auch von Privatpersonen genutzt. Eine Annahme dieser Studie ist, dass ein Spannungsdreieck zwischen Gesellschaft und Wirtschaft gezeichnet werden kann, wobei jeweils nur die angegebenen zwei Kriterien für die jeweilige Partei erfüllt werden können (Abbildung 1).

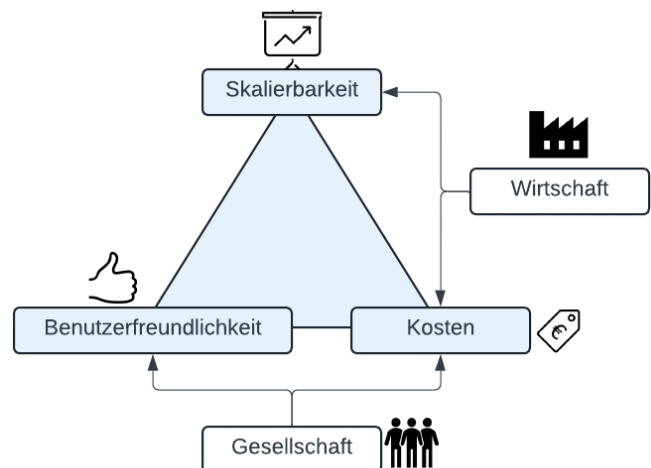


Abbildung 1: Spannungsdreieck - Gesellschaft und Wirtschaft

Im Folgendem werden die relevantesten Aspekte für Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft aufgelistet.

Umwelt

- Stromverbrauch
- CO₂ – Emissionen

Der Stromverbrauch einer Blockchain wird entweder durch die Quantifizierung des Energieverbrauchs pro Transaktion oder durch den Gesamtverbrauch an Strom pro Jahr ermittelt. Da jede Blockchain unterschiedlich viele Transaktionen verarbeitet, ist es im Vergleich relevanter auf den Verbrauch pro Transaktion zu achten.

Blockchain Server, auch Nodes genannt, sind in der Regel großflächig und dezentral verteilt. Privatpersonen können Betreiber von solchen Nodes sein und beliebig grünen Strom verwenden, ohne Angabe der Herkunft. Somit lassen sich CO₂-Emissionen von Blockchains nicht akkurat ermitteln [104]. Für eine wissenschaftliche Analyse wird somit der Stromverbrauch von Transaktionen betrachtet, um einen Vergleich ziehen zu können.

Wirtschaft

- Skalierbarkeit
- Kosten

Gute Skalierbarkeit ist ein wichtiges Thema in der Nachhaltigkeit. Dabei spielt der Konsensmechanismus eine große Rolle, denn dieser bestimmt, wie Nodes innerhalb eines Netzwerkes miteinander kommunizieren und wie die Validierung einer Transaktion ausgeführt wird [105]. Zum Quantifizieren wird hierbei die maximale Anzahl an Transaktionen pro Sekunde verwendet.

Transaktionskosten haben einen hohen Wert für Unternehmen, denn diese bestimmen die Kosten der internen Arbeitsarchitektur und des finalen Produktes. Transaktionskosten spiegeln nicht direkt die Kosten wider, welche bei der Erstellung von beliebig großen smart contracts entstehen, jedoch zeigen diese Daten einen Richtwert an, welcher eine Tendenz über die Endkosten angibt.

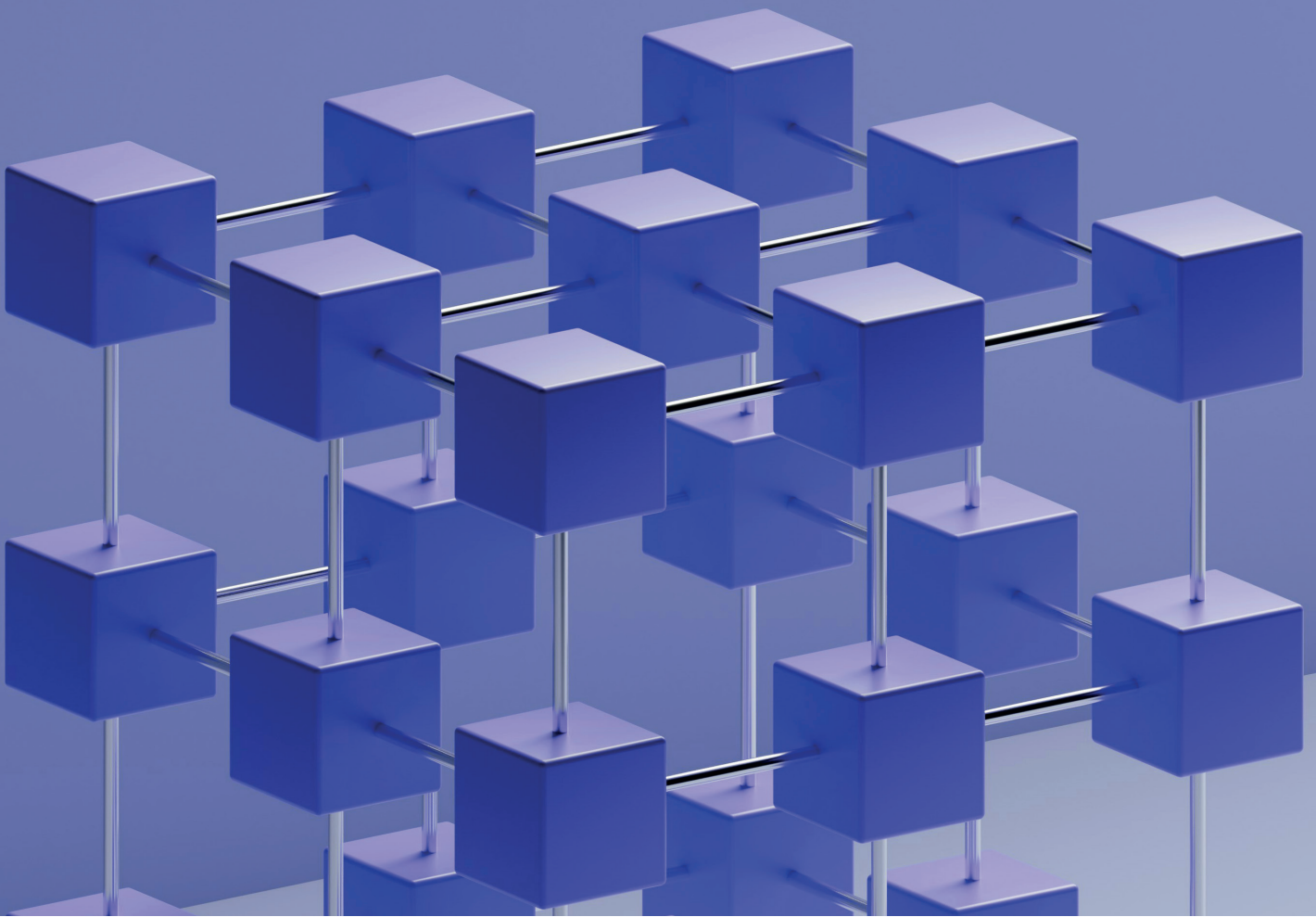
Gesellschaft

- Benutzerfreundlichkeit
- Transaktionskosten

Die erste programmierbare Blockchain ist Ethereum und führte als Programmiersprache Solidity ein [106]. Auf Grundlage der Konzepte von Ethereum entstanden viele EVM-kompatible Blockchains mit einer Großzahl an Programmierern in dieser Programmiersprache. Benutzerfreundlichkeit lässt sich dennoch nicht objektiv analysieren, somit wird diesem Aspekt keine starke Gewichtung in der Analyse zugeteilt.

Transaktionskosten spielen ebenso in der Gesellschaft eine große Rolle, denn basierend auf den Interaktionskosten einer Blockchain, entscheiden Privatpersonen welche Blockchain sie benutzen.

In Anbetracht dieser Kriterien werden nun Blockchains auf ihren Beitrag zur Nachhaltigkeit untersuchen.



Untersuchte Blockchains

Diese Studie bietet einen umfassenden Vergleich von 29 verschiedenen Blockchains. Im weiteren Verlauf werden die untersuchten Blockchains vorgestellt und

ihre jeweiligen Versprechen dargelegt. Die Reihenfolge erfolgt in alphabetischer Sortierung und soll keinerlei Wertung widerspiegeln.

1. **Algorand** verspricht ein dynamisches, inklusives, grenzenloses und skalierbares Ökosystem [110]
2. **Aptos** verspricht mit Hilfe von AI in diversen Bereichen wie Gaming, Social Media etc. eine umfassende Plattform für die Verwirklichungen großer Projekte [111]
3. **Arbitrum** verspricht Ethereum nachhaltiger und integrierter zu gestalten [112]
4. **Avalanche** verspricht zuversichtliche und schnelle Entwicklung wie auch eine schnelle und skalierbare Infrastruktur [113]
5. **BNB Chain** verspricht eine benutzerfreundliche Blockchain mit hoher Zuverlässigkeit [114]
6. **Caradno** verspricht eine sichere, transparente und nachhaltige Blockchain, welche auf peer-reviewter Forschung basiert [115]
7. **Celo** verspricht Ethereum skalierbar zu gestalten und einfach erreichbar zu sein [116]
8. **Cosmos** verspricht eine günstige und skalierbare Blockchain für Unternehmer und Benutzer [117]
9. **Cronos** verspricht eine EVM-kompatible und skalierbare Blockchain welche ebenso Interoperabilität und finanzielle Unterstützung bietet [118]
10. **EOS** verspricht eine energieeffiziente, Benutzer- und Entwicklerfreundliche EVM-kompatible Blockchain [119]

11. **Ethereum** verspricht Technologien, welche es ermöglichen digitales Geld und Anwendungssoftware dezentral zu befähigen [120]
12. **Fantom** verspricht eine entwicklerfreundliche Umgebung mit geringen Transaktionskosten und schnellen Transaktionsvalidierungen [51]
13. **Flow** verspricht eine erlaubnisfreie (permissionless) Blockchain, welche sofortig Transaktionen validiert und Mobilgerätoptimiert ist [121]
14. **Gnosis** verspricht eine dezentrale, günstige und neutrale Blockchain, welche einfache Betreuung von Nodes versichert [122]
15. **Harmony** verspricht eine skalierbare, sichere und private Blockchain, spezialisiert auf Mikrotransaktionen und Marktpreisgestaltung [123]
16. **Hedera** verspricht gute Performance, Sicherheit und Compliance als auch einfache Tokenisierungen von Vermögenswerten im großen Maßstab [124]
17. **Immutable X** verspricht eine skalierbare, sichere und umweltfreundliche Gamingfokussierte Blockchain [125]
18. **IOTA** verspricht sichere und nachhaltige Technologien, welche Zugang für alle Personen und digitale Anwendungen gewährleistet und kostenlose Transaktionen versichert [126]
19. **IOTA 2.0** verspricht eine der umweltfreundlichsten und nachhaltigsten Distributed-Ledger-Technologien [36]
20. **Klaytn** verspricht eine nachhaltige, transparente und Benutzerfreundliche Blockchain zu sein [127]
21. **Near** verspricht Entwicklern eine Blockchain, die es ermöglicht, Apps für Milliarden von Benutzern skalierbar und über alle Blockchains hinweg funktionsfähig zu realisieren [128]
22. **Optimism** verspricht eine Superchain für Interoperabilität zwischen verschiedenen Blockchains und versichert eine demokratische und transparente Führung [129]
23. **Polkadot** verspricht ein skalierbares, effizientes und sicheres übergreifendes Ökosystem, welches erlaubt eigene Blockchains zu erstellen [130]
24. **Polygon** verspricht eine Kohlenstoffneutrale unendlich skalierbare Infrastruktur von Blockchains, welche auf zero knowledge Technologien basiert [131]
25. **Solana** verspricht eine Kohlenstoffneutrale, leistungsstarke Entwicklerplattform und schnelle Nutzererfahrung [132]
26. **Stellar** verspricht eine schnelle, kostengünstige, energieeffiziente und nachhaltige Blockchain [133]
27. **TRON** verspricht hohe Durchsatzraten, Skalierbarkeit und Verfügbarkeit und behauptet die am schnellsten wachsende Blockchain zu sein [134]
28. **XRPL** verspricht eine Business basierte Blockchain, welche geringe Transaktionskosten, hohe Leistung und Nachhaltigkeit und Stabilität garantiert [135]
29. **Zilliqa** verspricht niedrige Transaktionskosten, hohe Skalierbarkeit, Nachhaltigkeit auf der Blockchain als auch Entwicklerfreundlichkeit und Sicherheit im Bezug zur Entwicklung und Interaktion [136]

Blockchains im Vergleich

In diesem Abschnitt werden 29 Blockchains einer eingehenden Untersuchung unterzogen, um ihre Nachhaltigkeitsmerkmale zu bewerten. Unterteilt wird das Kapitel in Energieverbrauch, Transaktionskosten und Benutzerfreundlichkeit.

Energieverbrauch

Ein essenzieller Aspekt zum Beitrag für Nachhaltigkeit wird durch den Energieverbrauch einer Blockchain widerspiegelt. Hierbei wurde nicht auf den Gesamtverbrauch einer Blockchain geachtet, sondern auf den Energieverbrauch einer einzelnen Transaktion. Zu einigen Blockchains fehlen Messdaten, welche entweder nicht von dem jeweiligen Blockchain-Unternehmen angegeben werden oder durch fehlende Daten nicht analysierbar sind. Im Folgendem werden 29 Blockchains auf den

Energieverbrauch, die einhergehenden CO2-Emissionen und den Gesamtverbrauch pro Jahr verglichen.

Dabei wurde Tabelle 1 (Anhang) nach Energieverbrauch pro Transaktion sortiert. Tabelle 1 wurde nicht nur nach dem Energieverbrauch pro Transaktion sortiert, sondern wurden auch die jeweiligen Blockchains entsprechend ihres Energieverbrauches farblich gruppiert. Die Zunahme an Energieverbrauch in den ersten 11 Blockchains ist exponentiell, mit einer Zunahme von bis zu 595-mal zwischen zwei Stufen. Abbildung 2 bildet die vier energieeffizientesten Blockchains als Balkendiagramm ab.

In Abbildung 3 wurden die Blockchains von Algorand bis EOS aufgelistet. Diese Abbildung veranschaulicht, wie deutlich die Unterschiede zwischen den Blockchains sind. In beiden Abbildungen, 2 und 3, wurde hierzu Algorand abgebildet, um diese Unterschiede zu veranschaulichen.

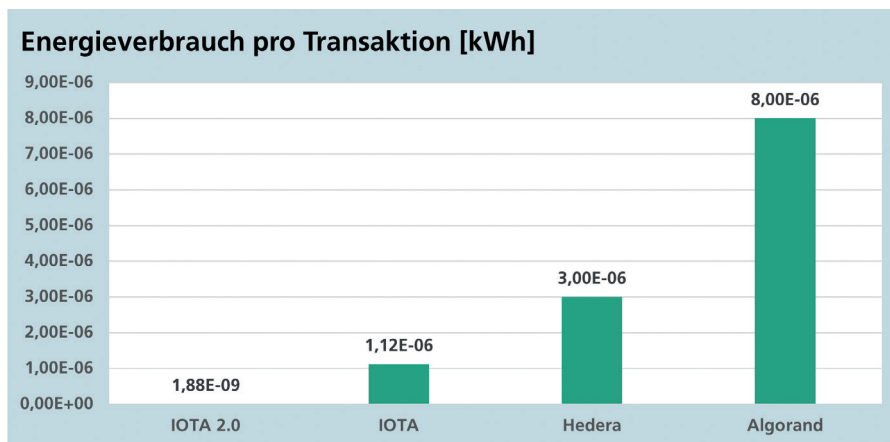


Abbildung 2: Energieverbrauch pro Transaktion der vier effizientesten Blockchains

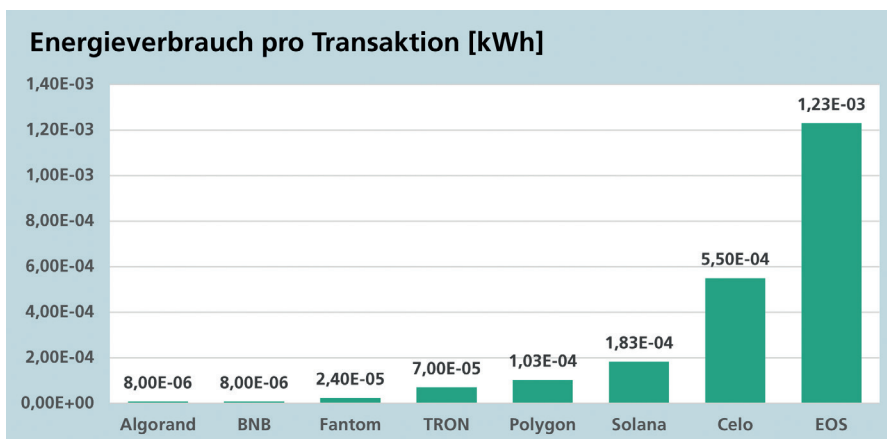


Abbildung 3: Energieverbrauch pro Transaktion (Platz 4-11)

Zu erkennen ist, dass an erster Stelle IOTA 2.0 steht, eine Blockchain, die zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie nur als Testnetzwerk zu Verfügung steht.

Des Weiteren enthält Tabelle 1 (Anhang) eine Spalte für CO₂-Emissionen, welche geschätzte Werte angibt, da die genaue Herkunft der Energiequellen oft nicht bekannt ist [104]. Einige von den Blockchains ergreifen Initiativen, um CO₂-Emissionen auszugleichen. Diese Maßnahmen könnten beispielsweise die Anpflanzung von Bäumen beinhalten. Blockchains, welche mehr CO₂-Emissionen ausgleichen als sie produzieren, sind Hedera, Polygon, Celo und Gnosis. Blockchains, welche genauso viele CO₂-Emissionen ausgleichen als sie produzieren, sind Algorand, Solana, EOS, Near, Immutable X und Avalanche. Diese Faktoren allein geben jedoch keinen Einblick in die Energieeffizienz der Blockchain, sie stellen eher eine Information dar. Diese Informationen in dieser Studie nicht stark gewichtet werden.

Transaktionskosten

Transaktionskosten sind ein bedeutender Aspekt, wenn es um die Bewertung der Nachhaltigkeit von Blockchains geht. Sie tragen dazu bei, die ökonomische Effizienz einer Blockchain zu bestimmen.

Da Blockchains von jeder Privatperson betrieben werden können und nicht zentralisiert sind, wurden Mechanismen entwickelt, um diese Privatperson zu entlohnen. Im klassischen Fall bekommen diese Privatpersonen einen Transaktionskostenanteil. Somit ist in den meisten Fällen jede Transaktion mit zusätzlichen Kosten verbunden. Hohe Transaktionskosten treten dazu bei, dass Anwender abgeschreckt werden und mit dem gegebenen Netzwerk nicht interagieren.

In Tabelle 2 (Anhang) sind durchschnittliche Transaktionskosten für 29 Blockchains in US-Dollar angegeben. Besonders auffällig hierbei ist, dass bei IOTA 2.0, IOTA und EOS keine Transaktionskosten anfallen.

Ebenso wurden hier die jeweiligen Blockchains nach Farbe gruppiert. Aufgrund der stark variierenden Gebühren wurden drei separate Balkendiagramme erstellt, um die Kostenunterschiede zu visualisieren:

Benutzerfreundlichkeit

Der Bereich der Benutzerfreundlichkeit ist im Kontext von Blockchain-Anwendungen eine Herausforderung, da dieser teilweise subjektiv geprägt ist. Dennoch wurde eine Analyse dieses Bereichs unternommen. Dabei wurden Aspekte wie die Time to Finality, die theoretisch maximale Anzahl an Transaktionen pro Sekunde (TPS), die Virtual Machine und die verschiedenen Konsensmechanismen betrachtet. Die Time to Finality gibt an, wie lange es dauert, bis eine Transaktion final auf der Blockchain gespeichert ist und somit in der Transaktionskette unwiderruflich verbaut ist [107]. Dies gibt nicht die Transaktionsbestätigungszeit an, also nicht die Zeit, die es benötigt, bis eine Transaktion validiert wird. Die Bestätigungszeit kann der Benutzer je nach Betragshöhe der Gasfees selbst manipulieren. Die Virtual Machine (VM) instanziiert eine Blockchain. Sie definiert die Funktionsweise und Ablauf einer Blockchain [108]. Im Fall von Ethereum heißt diese EVM (Ethereum Virtual Machine). Der Konsensmechanismus hat zwar einen Einfluss auf die Interaktionen der jeweiligen Nodes und deren Energieverbrauch, im Folgenden wird dies nicht als Kriterium für Nachhaltigkeit gewertet, denn nur der wahre Energieverbrauch ist von besonderer Bedeutung. Eine Übersicht zu den Daten ist in Tabelle 3 (Anhang) aufzufinden.

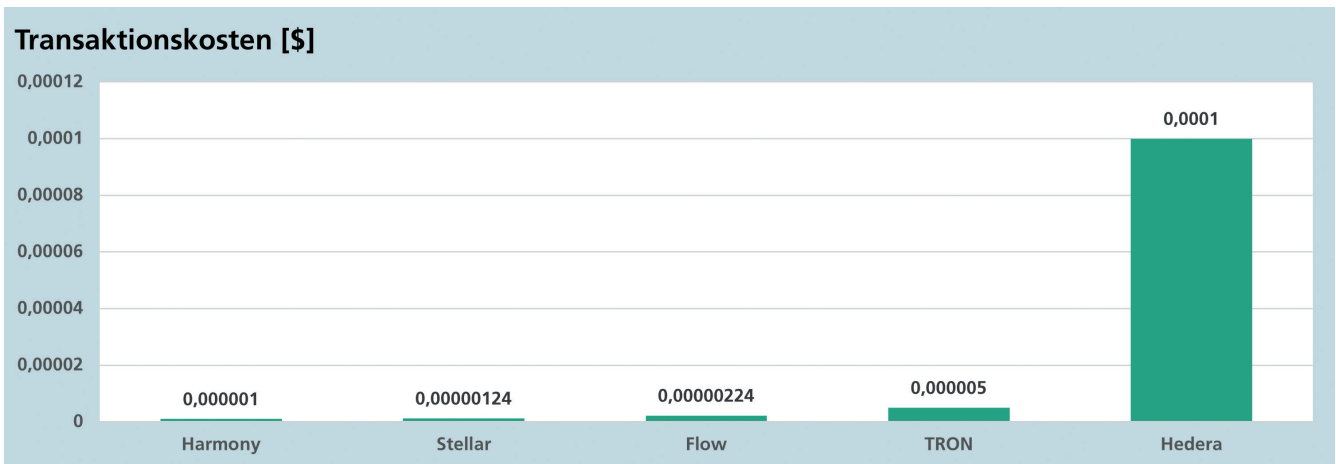


Abbildung 4: Kosten pro Transaktion (Platz 1-5)

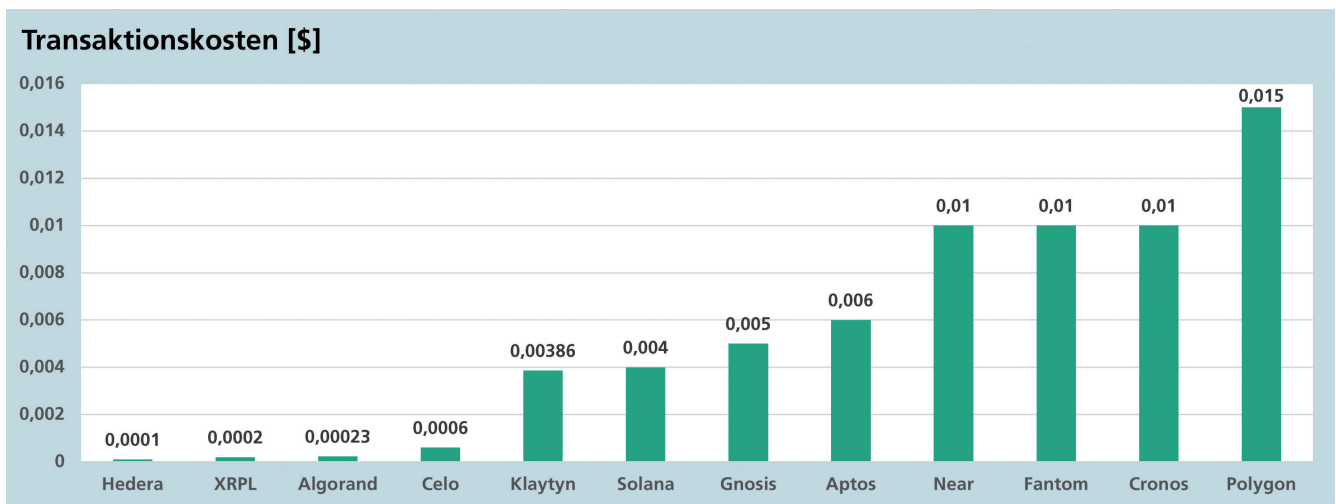


Abbildung 5: Kosten pro Transaktion (Platz 5-16)

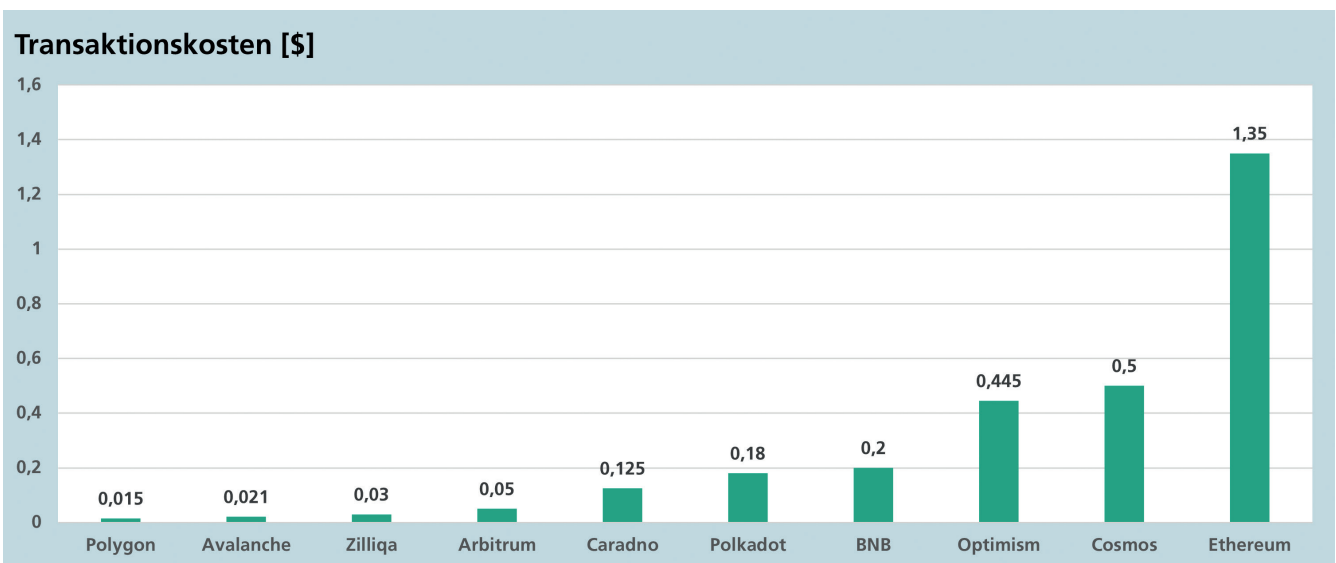


Abbildung 6: Kosten pro Transaktion (Platz 15-25)

Skalierbarkeit

Des Weiteren spielt die theoretisch maximale Anzahl an Transaktionen pro Sekunde (TPS) eine relevante Rolle, wenn es um Skalierbarkeit geht. Angenommen eine Blockchain kann 10 Transaktionen pro Sekunde verarbeiten und 1000 Transaktionen werden zur gleichen Zeit angefragt, somit müssten 990 Benutzer warten, bis deren Transaktionen bearbeitet werden. Diese Latenzen wirken sich ebenso auf die Benutzerfreundlichkeit aus.

Außerdem liegt ein wichtiger Faktor in der Anwendbarkeit und der Nutzerinteraktion sowie im Umfang des Anwendungsbereichs. Diese sind zwar tendenziell zu beobachten, aber schwer quantifizierbar. Im Folgendem wurden alle Skalierbarkeit- und Benutzerfreundlichkeitsbezogene Daten aufgelistet:

Da Skalierbarkeit im Vordergrund steht, wurde Tabelle 3 (Anhang) nach den maximalen TPS sortiert. Am letzten Platz steht die Ethereum Blockchain, welche 119 Transaktionen pro Sekunde verarbeiten kann. Im Gegensatz dazu, erreichen

Blockchains wie Flow, Polkadot, Aptos und Near bis zu über 100.000 TPS.

Grundsätzlich lässt sich nicht sagen, wie viele Transaktionen pro Sekunde nötig sind, um eine nachhaltige Zukunft zu gewährleisten, jedoch deutet eine höhere Anzahl an Transaktionen pro Sekunde auf eine bessere Skalierbarkeit hin. Abbildung 5 stellt alle Blockchains nach maximal erreichbaren TPS in absteigender Reihenfolge auf.

Erkennbar ist ebenso, dass viele Blockchains eine Time to Finality von unter 10 Sekunden aufweisen, was deutlich unter der Time to Finality von Bitcoin liegt (ca. 1 Stunde) [109]. Diese Werte zeigen die finale Speicherung von Transaktionen auf der Blockchain, jedoch treten diese keinen starken Wert zu der Benutzerfreundlichkeit bei.

Eine klare Tendenz bei den Engine-Typen ist erkennbar, da viele von ihnen mit der Ethereum Virtual Machine (EVM) kompatibel sind, was auch den größten Anteil am Markt widerspiegelt [4].

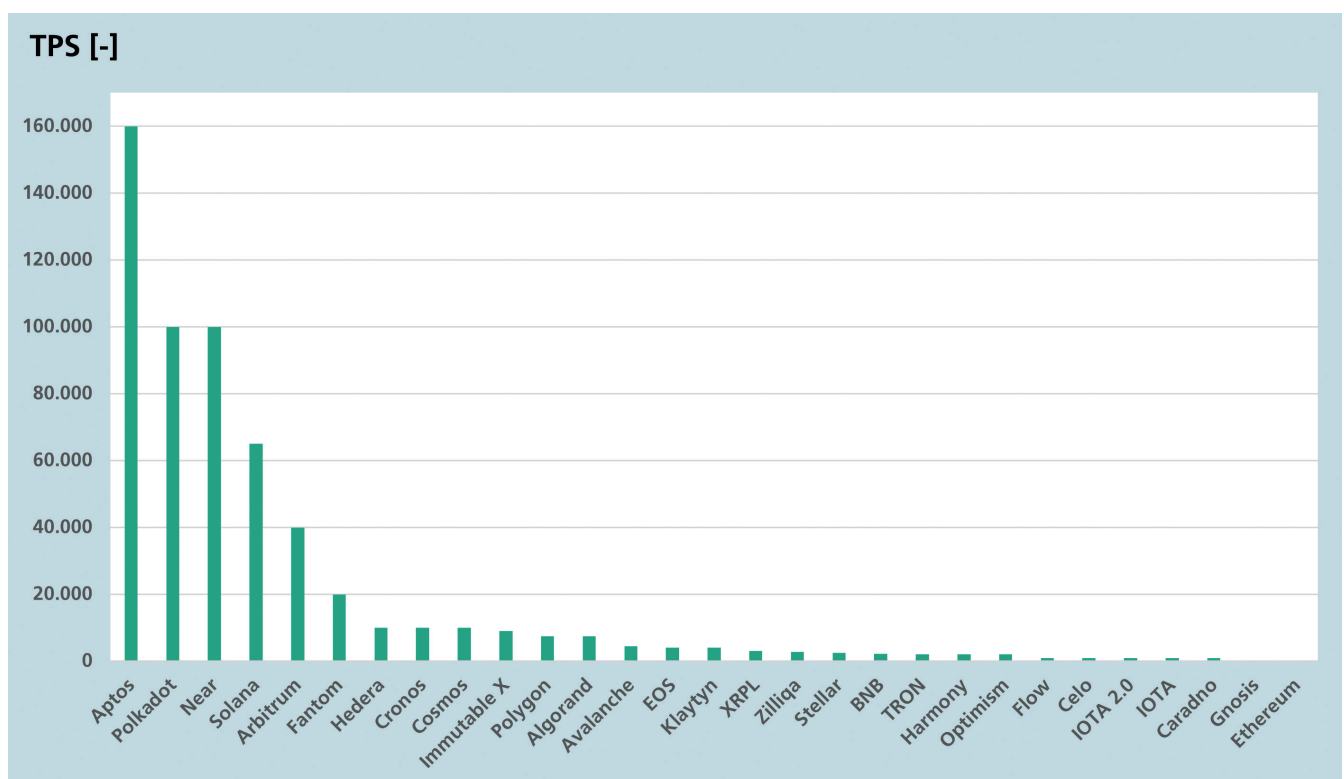
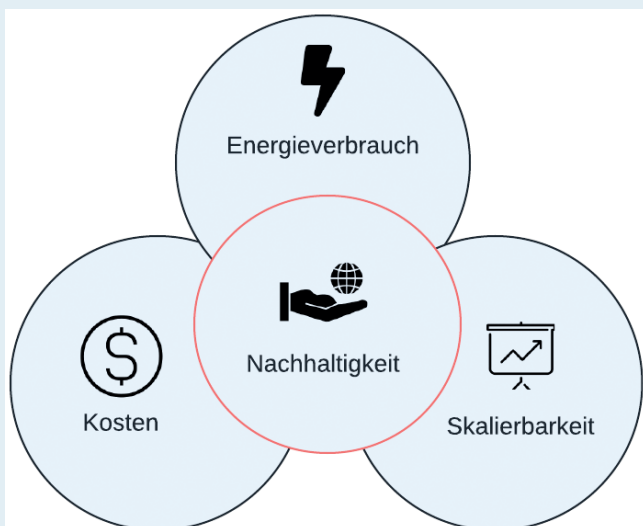


Abbildung 7: Transaktionen pro Sekunde



Schlussfolgerung

Untersucht wurden sowohl Umwelt als auch gesellschaftliche und wirtschaftliche Aspekte, welche besondere Relevanz auf die Nachhaltigkeit haben. Speziellen Wert wurde auf den



Stromverbrauch von Transaktionen gelegt, welche sich quantifizierbar vergleichen lassen und eine Schlussfolgerung auf reale CO₂ Emissionen ermöglichen. Ebenso wurde Wert auf die Skalierbarkeit und Transaktionskosten gesetzt.

In der Kategorie Stromverbrauch ergibt sich der klare Sieger IOTA 2.0. Bei einem Stromverbrauch von $1,883 \cdot 10^{-9}$ kWh pro Transaktion ist diese 595-mal effizienter als IOTA, die zweit effizienteste Blockchain in Bezug zum Stromverbrauch (Tabelle 1). Zu beachten ist nun, dass diese Blockchain aktuell eine Test Blockchain ist.

Im Aspekt der Transaktionskosten teilen sich IOTA, IOTA 2.0 und EOS den ersten Platz mit 0\$ Kosten pro Transaktion, wobei zu erwähnen ist, dass Blockchains mit Transaktionskosten von einigen bis nur Bruchteilen von Cents ebenso nahezu vernachlässigbar sind.

Zuletzt spielte Skalierbarkeit eine entscheidende Rolle, wobei die Anzahl der theoretisch erreichbaren maximalen Transaktionen pro Sekunde analysiert wurde. Besonders hervorstechend sind Aptos, Polkadot, Near, Solana, Arbitrum und Fantom, welche bis deutlich über 10.000 Transaktionen pro Sekunde verarbeiten können.

Betrachtet man nun alle erwähnten Aspekte der Nachhaltigkeit, so ist ersichtlich, dass im Bereich der Ökologie IOTA 2.0 als klarer Sieger hervor geht. Betrachtet man nun die Skalierbarkeit mit ein, könnten 1.000 TPS einen Engpass darstellen. Gute Alternativen wären, Hedera, Algorand, Fantom, Polygon, Solana und EOS.

Hervorzuheben sind die ökologischen Merkmale von Hedera und Algorand im Rahmen ihrer Blockchain-Infrastrukturen. Hedera strebt an, einen CO₂-negativen Fußabdruck zu erzielen, indem es mehr Kohlenstoffdioxid ausgleicht, als es produziert. Ebenso erreicht Hedera eine Transaktionsgeschwindigkeit von bis zu 10.000 Transaktionen pro Sekunde (TPS) bei Transaktionskosten von etwa 0,0001\$ und einem Stromverbrauch von $3 \cdot 10^{-6}$ Kilowattstunden (kWh).

Algorand deklariert sich als CO₂-neutral und weist Transaktionskosten von etwa 0,00023\$ und einen Stromverbrauch von $8 \cdot 10^{-6}$ kWh auf. Hierbei ist zu beachten, dass Algorands Transaktionskosten 23-Mal höher sind als bei Hedera und ebenso 2,67-Mal weniger Strom pro Transaktion verbraucht. Darüber hinaus zeichnet sich Solana durch eine bemerkenswerte Skalierbarkeit von bis zu 65.000 TPS aus und verfolgt ebenfalls das Ziel, CO₂-neutral zu sein. Jedoch hat die Zuverlässigkeit des Netzwerks aufgrund früherer Ausfälle gelitten, was sich ebenfalls negativ auf die Nachhaltigkeitsbemühungen auswirkt.

Man erkennt also, dass verschiedene Blockchains unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen.

Die ursprüngliche Annahme aus Abbildung 1 besagte, dass für die Wirtschaft die Benutzerfreundlichkeit nicht von besonderer Relevanz sei. Analoges gelte für die Gesellschaft und die Skalierbarkeit. Im Blockchain vergleich erkennt man jedoch, dass Skalierbarkeit und Benutzerfreundlichkeit in Bezug zu Blockchain eng miteinander verbunden sind.

Schlussendlich lässt sich somit nicht DIE beste Blockchain im Bereich der Nachhaltigkeit krönen. Verschiedene Blockchains haben unterschiedliche Aspekte, welche für sich sprechen. Bei der Auswahl der geeigneten Blockchain-Technologie ist es entscheidend, den spezifischen Anwendungsfall sowie die damit verbundenen Anforderungen sorgfältig zu berücksichtigen. In einigen Fällen kann es vorteilhaft sein, eine Blockchain mit niedrigeren TPS zu verwenden, wenn dies mit einem entsprechenden Rückgang der Emissionen einhergeht.

Referenzen

- [1] Bitcoin Energy Consumption index. Digiconomist. (2024, January 10). <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 04)
- [2] Bitcoin transaction fee (l:BATF). YCharts. (n.d.). https://ycharts.com/indicators/bitcoin_average_transaction_fee (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 04)
- [3] Visa crypto thought leadership – a deep dive on Solana. Visa. (n.d.). <https://usa.visa.com/solutions/crypto/deep-dive-on-solana.html> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 04)
- [4] Kryptowährung: Kurse, charts und marktkapitalisierung. CoinGecko. (n.d.). <https://www.coingecko.com/de> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 04)
- [5] CCRI indices. CCRI Indices. (n.d.). <https://indices.carbon-ratings.com/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 04)
- [6] How green is your cryptocurrency? list of top 100+ cryptos (2024). Cryptowisser. (n.d.). <https://www.cryptowisser.com/crypto-carbon-footprint/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 04)
- [7] Person. (2023, September 26). All you need to know about layer 1 (and 2) transaction finality - curvegrid. RSS. <https://www.curvegrid.com/blog/2023-06-28-all-you-need-to-know-about-layer-1-and-2-transaction-finality> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 04)
- [8] Chainspect. (n.d.). TPS dashboard [real metrics]. <https://chainspect.app/dashboard> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 04)
- [9] Top 50 EVM compatible networks. DezentralizedFinance.com. (2022, October 21). <https://dezentralizedfinance.com/top-50-vm-compatible-network/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 04)
- [10] Bhalla, A. (2024, February 29). Top cryptocurrencies with their high transaction speeds [updated]. Blockchain, AI & Web3 Certifications. <https://www.blockchain-council.org/cryptocurrency/top-cryptocurrencies-with-their-high-transaction-speeds/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 04)
- [11] What do you prefer - maximum security or cheaper transactions?. The Value Layer of the Internet. (n.d.). <https://polygon.technology/blog/what-do-you-prefer-maximum-security-or-cheaper-transactions> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 04)
- [12] Stevens, R. (2023, March 21). What is arbitrum? speeding up Ethereum using optimistic Rollups. Decrypt. <https://decrypt.co/resources/what-is-arbitrum-speeding-up-ethereum-using-optimistic-rollups> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [13] Zimwara, T. (2023b, November 29). BNB's tech roadmap for Opbnb targets 10,000 transactions per second – blockchain bitcoin news. Bitcoin News. <https://news.bitcoin.com/bnbs-tech-roadmap-for-opbnb-targets-10000-transactions-per-second/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [14] Crypto.com. (n.d.). What is Aptos (APT)? <https://crypto.com/university/what-is-aptos-token-apt> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [15] Fantom Network (FTM). (n.d.). <https://support.bitso.com/hc/en-us/articles/6844980235412-Fantom-Network-FTM> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [16] Bilušić, M. (2022, June 3). Celo – blockchain with fast, cheap, and secure transactions Altcoin Buzz. Altcoin Buzz. <https://www.altcoinbuzz.io/reviews/altcoin-projects/celo-blockchain-with-fast-cheap-and-secure-transactions/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [17] fvmnGEUzSW2RapB8a3XRYF, Author, Schultz, L., 8544927f-ba8f-41ea-b2b5-d2c5f9a2d338, & 2022-01-07T08:42:50Z. (2023, April 13). What is Polkadot (DOT) and how does it work?. Firi. <https://firi.com/cryptocurrency/polkadot-dot/what-is-polkadot> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [18] Beat, C. (2023, January 24). Flow crypto: NBA top shot. Medium. <https://medium.com/coinmonks/flow-crypto-nba-top-shot-bee813c3af94> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [19] Neiheiser, R., Inácio, G., Rech, L., Montez, C., Matos, M., & Rodrigues, L. (2023). Practical Limitations of Ethereum's Layer-2. IEEE Access, 11, 8651-8662.

- [20] Overview. Klaytn Docs. (2024, March 27). <https://docs.klaytn.foundation/docs/learn/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [21] Coinstages. (2024, January 8). XRP's turbocharged blockchain: 12.24 million transactions per hour. Binance. <https://www.binance.com/en/square/post/2449496484593> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [22] Nambiampurath, R. (2022, September 6). What is near protocol?. The Defiant. <https://thedefiant.io/what-is-near-protocol-2> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [23] HBAR (h). Hedera. (n.d.). <https://hedera.com/hbar> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [24] Roy, G. (2024, March 8). Investing in harmony (one) – everything you need to know. Securities.io. <https://www.securities.io/investing-in-harmony/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [25] Pintu. (2023, March 17). What is Immutable X (IMX)? Explained - Pintu Academy. Explained - Pintu Academy. <https://pintu.co.id/en/academy/post/what-is-immutable-x> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [26] Ethereum.org. (n.d.). Ethereum Energy Consumption. ethereum.org. <https://ethereum.org/en/energy-consumption/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [27] Chainspect. (2024, April 4). What is transactions per second (TPS)? [real TPS in 2024]. <https://chainspect.app/blog/transactions-per-second-tps> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [28] Ethereum average transaction fee (I:EATFND). YCharts. (n.d.-b). https://ycharts.com/indicators/ethereum_average_transaction_fee (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [29] Sarkar, A. (2022, October 29). The merge brings down Ethereum's network power consumption by over 99.9%. Cointelegraph. <https://cointelegraph.com/news/the-merge-brings-down-ethereum-s-network-power-consumption-by-over-99-9> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [30] Wright, K. (2021, November 26). Report claims each Solana TX uses less energy than 2 google searches. Cointelegraph. <https://cointelegraph.com/news/report-claims-each-solana-tx-uses-less-energy-than-2-google-searches> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [31] Solana's Energy Use Report: December 2023. Solana. (2023, December 6). <https://solana.com/news/solana-energy-use-report-december-2023> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [32] Solana Climate Dashboard: Trycarbonara Overview. Solana Climate Dashboard | Trycarbonara Overview. (n.d.). <https://solanaclimate.com/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [33] Late, T. (2024, February 19). How much is Solana Gas Fee?. CoinCodex. <https://coincodex.com/article/24933/solana-gas-fees/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [34] Solana vs. Ethereum: Renewed debate erupts over efficiency, development and scalability. FXStreet. (n.d.). <https://www.fxstreet.com/cryptocurrencies/news/solana-vs-ethereum-renewed-debate-erupts-over-efficiency-development-and-scalability-202310191136> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [35] Blockchain protocols and their energy footprint. Adan. (2023, January 12). <https://www.adan.eu/en/publication/blockchain-protocols-and-their-energy-footprint/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [36] Foundation, I. (2023, June 9). Energy consumption of IOTA 2.0. IOTA Foundation Blog. <https://blog.iota.org/energy-consumption-of-iota-2-0/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, Mai 04)
- [37] Foundation, I. (2024, February 13). Iota 2.0 ama. IOTA Foundation Blog. <https://blog.iota.org/iota-20-ama/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [38] Messari Crypto News. (n.d.). <https://messari.io/report/optimism-q3-2023-brief> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [39] Messari Crypto News. (n.d.-a). <https://messari.io/report/state-of-polygon-q3-2023> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [40] The polygon blockchain is here. zondacrypto. (n.d.). <https://zondacrypto.com/de/aktuelles/the-polygon-blockchain-is-here> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [41] KlimaDAO. (2022, June 19). Polygon goes carbon neutral via KLIMADAO: The Green Manifesto in Action. <https://www.klimadao.finance/resources/polygon-goes-carbon-neutral-via-klimadao-the-green-manifesto-in-action> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [42] Polygon pos: The most efficient blockchain protocol. Polygon PoS | The most efficient blockchain protocol. (n.d.). <https://polygon.technology/polygon-pos> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [43] What are arbitrum gas fees?. Arbitrum Gas Fees-Beginners Guide & Comparison. (n.d.). <https://www.hord.fi/blog/arbitrum-gas-fees> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)

- [44] Routsan.io. (n.d.). Gas tracker - snowtrace. Snowtrace Blockchain Explorer. <https://snowtrace.io/gastracker> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, Juni 03)
- [45] Mattereum. (2021, November 4). How @avalancheavax @nori @mattereum changed the world today. in spring Vinay Gupta (CEO of Mattereum) did a rough calc of @avalancheavax CO2 emissions to see if it could be a green chain. it was low. really low. double checked with @Nori and they confirmed the estimate. 1/5. Twitter. <https://twitter.com/mattereum/status/1456315959141076993> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [46] Binance Smart Chain Average Transaction Fee (l:BSCATFND). YCharts. (n.d.-a). https://ycharts.com/indicators/binance_smart_chain_average_transaction_fee_es (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [47] Admin. (2024, January 18). Green coding and it energy consumption: Blockchain and cryptocurrencies. Exove. <https://www.exove.com/blogs/green-coding-and-it-energy-consumption-blockchain-and-cryptocurrencies/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [48] Messari Crypto News. (n.d.-a). <https://messari.io/report/state-of-aptos-q3-2023> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [49] Aptos emerges as frontrunners for fastest time to finality: Messari. RSS. (n.d.). <https://www.bsc.news/post/aptos-emerges-as-frontrunners-for-fastest-time-to-finality-messari>
- [50] Move - A Web3 language and runtime. Aptos Docs. (2024, March 16). <https://aptos.dev/concepts/move-on-aptos/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [51] Build your best dapp. Fantom. (n.d.). <https://fantom.foundation/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, Mai 04)
- [52] Pomposi, S. (2021, November 23). Fantom, the eco-friendly blockchain. Fantom Insights. <https://blog.fantom.foundation/fantom-the-eco-friendly-blockchain/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [53] Messari Crypto News. (n.d.-a). <https://messari.io/report/state-of-celo-q4-2023> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [54] Foundation, C. (2021, May 28). A carbon negative blockchain? it's here and it's Celo. Medium. <https://blog.celo.org/a-carbon-negative-blockchain-its-here-and-its-celo-60228de36490> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [55] Polkadot showcases industry-leading scalability in positive end to 2023. Polkadot Network. (n.d.). https://polkadot.network/blog/polkadot_q4_update_data (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [56] Messari Crypto News. (n.d.-a). <https://messari.io/report/state-of-cardano-q4-2023> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [57] Layer-1 performance: Comparing 6 leading blockchains. World news about cryptocurrency and blockchain technology from different sources. (2023, July 28). <https://cryptonews.net/news/analytics/21373397/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [58] Blockchain protocols and their energy footprint. Adan. (2023a, January 12). <https://www.adan.eu/en/publication/blockchain-protocols-and-their-energy-footprint/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [59] Flow is leading the way for sustainable technology in WEB3. Flow is leading the way for sustainable technology in Web3. (n.d.). <https://flow.com/sustainability> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [60] Fees. Flow Developer Portal. (n.d.). <https://developers.flow.com/build/basics/fees> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 023)
- [61] Khatibi, A. V. (2023, November 25). Touring sonic - what is time to finality?. Fantom Insights. <https://blog.fantom.foundation/touring-sonic-what-is-time-to-finality/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [62] EVM on flow. Flow is building the future of culture and community in Web3. (n.d.). <https://flow.com/upgrade/crescendo/evm> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [63] Flow vs ethereum. which is best for NFT development?. PixelPlex. (n.d.). <https://pixelplex.io/blog/flow-vs-ethereum-comparison-best-platforms-for-nft/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [64] Gnosis chain statistics. Blockscout. (n.d.). <https://gnosis.blockscout.com/stats> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [65] The dao chain. Gnosis Chain. (n.d.-a). <https://www.gnosis.io/blog/ps13aapsjp0kdex7bnylbms2ui1-2inqwczug3zbg0> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [66] Atom die gebühren: Wie viel Kostet es, cosmos zu senden (atom). ATOM Die Gebühren: Wie viel kostet es, Cosmos zu senden (ATOM). (n.d.). <https://www.cropty.io/de/fees/atom> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [67] Seq. (2021, November 17). Comparison between Avalanche, cosmos and polkadot. Medium. <https://medium.com/avalanche-hub/comparison-between-avalanche-cosmos-and-polkadot-a2a98f46c03b> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)

- [68] Kubinec, J. (n.d.). Evmos hopes to lure ethereum developers to IBC by deprecating cosmos transactions. Blockworks. <https://blockworks.co/news/evmos-cosmos-ethereum-evm> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [69] Stellar network: Cross-border payments with XLM. Gemini. (n.d.). <https://www.gemini.com/cryptopedia/stellar-blockchain-payments-xlm-coin#section-enhanced-by-stellar-networks-built-in-features> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [70] How Stellar works: a quick, non-technical guide. (n.d.-b). <https://resources.stellar.org/hubfs/Proof%20of%20Agreement%20explainer.pdf> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [71] Takyar, A. (2023, February 22). Stellar-vs-EVM-based-blockchains. LeewayHertz. <https://www.leewayhertz.com/stellar-vs-evm-based-blockchains/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [72] AK, Q. (2023, November 26). Crypto transaction fees: XRPL dominates with lowest fees, leaves behind BTC, eth, Ada, Matic. Coinpedia Fintech News. <https://coinpedia.org/news/ripple-news-xrp-shatters-traditional-transaction-fee-norms-outperforming-btc-eth-ada-and-matic/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [73] Klaytn. (2022, July 20). A comparison of Blockchain Network latencies. Medium. <https://medium.com/klaytn/a-comparison-of-blockchain-network-latencies-7508509b8460> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [74] BitPowr. (n.d.). How to send fee-less tron transactions. Bitpowr. <https://bitpowr.com/blog/how-to-send-fee-less-tron-transactions> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [75] Lucas, S. (2023, October 6). Near protocol: Scalability through sharding - crypto: Sygnum Bank - invest in crypto with a regulated Swiss bank. Sygnum Bank. <https://www.sygnum.com/future-finance/crypto/near-protocol-scalability-through-sharding/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [76] What is near & how does it work? who created near?. Kriptomat. (2022, September 2). <https://kriptomat.io/crypto-currencies/near/what-is-near-protocnear-protocol/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [77] Team, N. (2023, July 17). Near Foundation signs up to the Ethereum Climate Platform . NEAR Protocol. <https://near.org/blog/near-foundation-signs-up-to-the-ethereum-climate-platform> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [78] Why algorand?. Algorand Developer Portal. (n.d.). https://developer.algorand.org/docs/get-started/basics/why_algorand/ (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [79] Structure. Algorand Developer Portal. (n.d.-a). <https://developer.algorand.org/docs/get-details/transactions/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [80] J. Martin, M. D. (2023, October 6). Green is good: Algorand uses only 80 kW of energy, carbon offsetting as previously pledged. AlgoDaddy. <https://www.algodaddy.org/2023/02/algorand-uses-only-80-kw-energy-carbon-offsetting.html> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [81] How algorand offsets its carbon footprint. (n.d.-b). <https://algorandtechnologies.com/news/how-algorand-offsets-carbon-footprint> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [82] Solving the "Blockchain trilemma." (n.d.-d). <https://algorandtechnologies.com/technology/solving-the-blockchain-trilemma> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [83] Zilliqa. (n.d.). <https://www.zilliqa.com/what-is-zil> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [84] Stakin. (2023, May 19). Zilliqa and EVM - expanding the ecosystem. <https://blog.stakin.com/zilliqa-and-evm-expanding-the-ecosystem/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [85] What is the Ethereum Virtual Machine & How Does It Work? | Hedera. (n.d.-e). <https://hedera.com/learning/smart-contracts/ethereum-virtual-machine> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [86] UCL Centre for blockchain technologies discussion paper. Hedera. (n.d.-b). <https://hedera.com/ucl-blockchain-energy> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, Mai 15)
- [87] Going carbon negative at Hedera hashgraph | Hedera. (n.d.-b). <https://hedera.com/blog/going-carbon-negative-at-hedera-hashgraph> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [88] Attar, Z. (2023, November 24). Cronos Blockchain: High speed, low fees, and Energy Efficiency. Medium. [https://med\[\]](https://med[]) (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [89] Fees. Immutable Documentation. (n.d.). <https://docs.immutable.com/docs/x/fees/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [90] Eos Eos Price, live charts, and news in United States. (n.d.-a). <https://www.coinbase.com/price/eos> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [91] Zia, I. (2024, February 22). Eos Leap 6: How it introduces fast finality, flexibility, and a new consensus. DailyCoin. <https://dailycoin.com/what-eos-leap-6-hard-fork-brings/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)

- [92] Foundation, E. N. (2023, October 12). Climate positivity: Eos Network's commitment to sustainability strengthened through ENF and upland collaboration. <https://eosnetwork.com/blog/eos-blockchain-climate-positive-2023/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [93] Authority, E. (n.d.). The future of blockchain is sustainable. Making EOS the first major carbon neutral blockchain. <https://eosauthority.com/green/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 05)
- [94] Immutable has measured their emissions & started their net zero journey. has measured their emissions & started their net zero journey. (n.d.). <https://www.our-trace.com/brand/immutable> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 22)
- [95] Gnosis chain is carbon neutral with Offsetra. Offsetra. (n.d.). <https://offsetra.com/profile/gnosischain> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 22)
- [96] Introduction. IOTA Wiki. (2024, February 2). <https://wiki.iota.org/get-started/introduction/iota/introduction/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 23)
- [97] Harmony. Transactions. (n.d.). <https://docs.harmony.one/home/general/technology/transactions> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 23)
- [98] Culotta, C., Brüning, S., Schulte, A. T., Gesmann-Nuissl, D., Märkel, C., & Beck, R. (2022). Nachhaltigkeit im Kontext der Blockchain-Technologie: Anwendungsbeispiele, Herausforderungen und Handlungsfelder.
- [99] Blockchain-Strategie der bundesregierung. Die Bundesregierung informiert | Startseite. (n.d.-b). <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/publikationen/blockchain-strategie-der-bundesregierung-1672384> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 27)
- [100] Blockchain - Fraunhofer Fit. (n.d.). https://www.fit.fraunhofer.de/content/dam/fit/de/documents/Blockchain_WhitePaper_Grundlagen-Anwendungen-Potentiale.pdf (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 27)
- [101] Blockchain energy consumption an exploratory study - aramis. (n.d.-b). <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=68053&Load=true> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 27)
- [102] Hildenbrandt, E., Saxena, M., Rodrigues, N., Zhu, X., Daian, P., Guth, D., ... & Rosu, G. (2018, July). Kevm: A complete formal semantics of the ethereum virtual machine. In 2018 IEEE 31st Computer Security Foundations Symposium (CSF) (pp. 204-217). IEEE.
- [103] Franz, J. H. (2022). Was ist Nachhaltigkeit?. In Nachhaltige Entwicklung technischer Produkte und Systeme: Der Ingenieurberuf im Wandel (pp. 7-14). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [104] Mora, C., Rollins, R. L., Taladay, K., Kantar, M. B., Chock, M. K., Shimada, M., & Franklin, E. C. (2018). Bitcoin emissions alone could push global warming above 2 C. *Nature Climate Change*, 8(11), 931-933.
- [105] Lashkari, B., & Musilek, P. (2021). A comprehensive review of blockchain consensus mechanisms. *IEEE access*, 9, 43620-43652.
- [106] Buterin, V. (2013). Ethereum white paper. GitHub repository, 1, 22-23.
- [107] Chainspect. (2024, April 10). What is time to finality (TTF)? [real TTF in 2024]. <https://chainspect.app/blog/time-to-finality-ttf> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 28)
- [108] Virtual Machines. Avalanche Dev Docs. (n.d.). <https://docs.avax.network/learn/avalanche/virtual-machines> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 28)
- [109] Binance Academy. (n.d.). Finality. <https://academy.binance.com/en/glossary/finality> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, April 28)
- [110] Algorand Foundation. (n.d.). <https://www.algorand.foundation/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, Mai 04)
- [111] The world's most production-ready blockchain. Aptos. (n.d.). <https://aptosfoundation.org/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, Mai 04)
- [112] The future of ethereum. Arbitrum. (n.d.). <https://arbitrum.io/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, Mai 04)
- [113] Avalanche: Create without limits: Dapp platform. Avalanche: Create Without Limits | dApp Platform. (n.d.). <https://www.avax.network/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, Mai 04)
- [114] BNB Smart Chain (BSC): Bring smart contracts to BNB chain. BNB Chain. (n.d.). <https://www.bnbchain.org/en/bnb-smart-chain> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, Mai 04)
- [115] Cardano - making the world work better for all: Cardano. Cardano RSS. (n.d.). <https://cardano.org/> (Zuletzt aufgerufen am: 2024, Mai 04)

Anhang

Tabelle 1 Energieverbrauch und Emissionen

Blockchain	Energieverbrauch pro Transaktion	CO ₂ -Emissionen pro Transaktion [kg CO ₂]	Energieverbrauch pro Jahr [kWh]	CO ₂ -Emissionen pro Jahr [kg CO ₂]	Quellen
IOTA 2.0	<0,01 [1,883*10 ⁻⁹]	<0,00475	18.923,25	-	[6],[36],[37]
IOTA	<0,01 [1,12*10 ⁻⁶]	<0,00475	-	-	[6],[35],[36]
Hedera	<0,01 [3*10 ⁻⁶]	<0,00475	-	-	[5],[6],[86],[87]
Algorand	<0,01 [8*10 ⁻⁶]	<0,00475	650.181,40	298.433,30	[5],[6],[80],[81]
BNB	<0,01 [8*10 ⁻⁶]	<0,00475	16.446,50	6.309,10	[5],[6],[47]
Fantom	<0,01 [2,4*10 ⁻⁵]	<0,00475	8.200,00	-	[6],[52]
TRON	<0,01 [7*10 ⁻⁵]	<0,00475	162.868,00	69.470,00	[5],[6]
Polygon	<0,01 [1,03*10 ⁻⁴]	<0,00475	126.814,00	38.324,70	[5],[6],[41],[42]
Solana	<0,01 [1,83*10 ⁻⁴]	<0,00475	22.660.900,00	9.162.400,00	[5],[6],[30],[31],[32],[34]
Celo	<0,01 [5,5*10 ⁻⁴]	<0,00475	46.893,73	17.210,00	[6],[54]
EOS	<0,01 [1,23*10 ⁻³]	<0,00475	630.720	281.000	[6],[92],[93]
Stellar	<0,01	<0,00475	15.538,20	5.713,60	[5],[6]
XRPL	<0,01	<0,00475	57.382,20	23.378,60	[5],[6]
Near	<0,01	<0,00475	-	174.123,00	[6],[77]
Immutable X	<0,01	<0,00475	-	-	[6],[94]
Arbitrum	<0,01	<0,00475	-	-	[6]
Avalanche	<0,01	<0,00475	735.354,00	283.335,20	[5],[6],[45]
Flow	0,01=<x<1	0,00475 ≤x<0,475	180.000	56281,626	[6],[59]
Harmony	0,01=<x<1	0,00475 ≤x<0,475	-	-	[6]
Klaytn	0,01=<x<1	0,00475 ≤x<0,475	-	-	[6]
Aptos	0,01=<x<1	0,00475 ≤x<0,475	-	-	[6]
Cronos	0,01=<x<1	0,00475 ≤x<0,475	-	-	[6]
Zilliqa	0,01=<x<1	0,00475 ≤x<0,475	-	-	[6]
Polkadot	0,01=<x<1	0,00475 ≤x<0,475	172.394,80	48.627,80	[5],[6]
Optimism	0,01=<x<1	0,00475 ≤x<0,475	-	-	[6]
Cosmos	0,01=<x<1	0,00475 ≤x<0,475	632.577,50	290.353,10	[5],[6]
Ethereum	0,01=<x<1 [0,03]	0,00475 ≤x<0,475	2.600.000,00	870.000,00	[5],[6],[26],[29]
Cardano	0,01=<x<1 [0,5479]	0,00475 ≤x<0,475	941.338,30	340.162,90	[5],[6],[35]
Gnosis	-	-	-	-	[95]

Tabelle 2 Transaktionskosten

<i>Blockchain</i>	<i>Kosten pro Transaktion [\$]</i>	<i>Quellen</i>
<i>IOTA 2.0</i>	0	[96]
<i>IOTA</i>	0	[96]
<i>EOS</i>	0	[90]
<i>Harmony</i>	0,000001	[97]
<i>Stellar</i>	0,00000124	[69]
<i>Flow</i>	0,00000185	[60]
<i>TRON</i>	0,000005	[74]
<i>Hedera</i>	0,0001	[85]
<i>XRPL</i>	0,0002	[72]
<i>Algorand</i>	0,00023	[79]
<i>Celo</i>	0,0006	[53]
<i>Klaytn</i>	0,00386	[73]
<i>Solana</i>	0,004	[33]
<i>Gnosis</i>	0,005	[64]
<i>Aptos</i>	0,006	[48]
<i>Near</i>	0,01	[22]
<i>Fantom</i>	0,01	[51]
<i>Cronos</i>	0,01	[88]
<i>Polygon</i>	0,015	[39]
<i>Avalanche</i>	0,021	[44]
<i>Zilliqa</i>	0,03	[83]
<i>Arbitrum</i>	0,05	[43]
<i>Caradno</i>	0,125	[56]
<i>Polkadot</i>	0,18	[55]
<i>BNB</i>	0,2	[46]
<i>Optimism</i>	0,445	[38]
<i>Cosmos</i>	0,5	[66]
<i>Ethereum</i>	1,35	[28]
<i>Immutable X</i>	2,00%	[89]

Tabelle 3 Skalierbarkeit und Benutzerfreundlichkeit

Blockchain	Max. TPS	Time to Finality[sec]	Consensus Mechanismus	Engine Typ	Quellen
Aptos	160.000	0,9	PoS	MoveVM	[14],[49],[50]
Polkadot	100.000	60	Nominated PoS	PolkaVM	[17],[67]
Near	100.000	1	Threshold PoS	Custom/ EVM	[22],[75],[76]
Solana	65.000	12,8	PoH	SolanaVM	[10]
Arbitrum	40.000	1,5	PoS	EVM	[7],[12]
Fantom	20.000	3	Fantom Opera	EVM	[15],[51]
Hedera	10.000	7	Hashgraph	EVM	[23],[85]
Cronos	10.000	5,5	PoA	EVM	[88],[119]
Cosmos	10.000	6	PoS	Evmos / EVM	[10],[67],[68]
Immutable X	9.000	300	ZK-Rollup	zkEVM / EVM	[25]
Polygon	7.500	3	PoS	EVM	[11],[40],[42]
Algorand	7.500	3	Pure PoS	AlogVM	[10],[78],[82]
Avalanche	4.500	0	PoS	EVM	[10],[67]
EOS	4.000	2	Delegated PoS	EVM	[10],[91],[109]
Klaytn	4.000	0	PoS	EVM	[20],[73]
XRPL	3.000	-	XRP Ledger	EVM	[10],[21]
Zilliqa	2.828	-	PoW	EVM	[83],[84]
Stellar	2.500	5	Star Consensus Protokoll	custom	[10],[70],[71]
BNB	2.222	1	PoS Authority	EVM	[8],[13],[109]
TRON	2.000	57	Delegated PoS	EVM	[10]
Harmony	2.000	1	PoS	EVM	[24]
Optimism	2.000	2	PoS	EVM	[7]
Flow	1.000	1	PoS	EVM	[18],[61],[62]
Celo	1.000	5	PoS	EVM	[16]
IOTA 2.0	1.000	10	DAGs	EVM	[10],[36]
IOTA	1.000	10	DAGs	EVM	[36]
Cardano	1.000	35	PoS	EVM	[10],[57]
Gnosis	156	240	Delegated PoS	EVM	[8],[19],[65]
Ethereum	119	960	PoS	EVM	[27]

Autor

Mikolaj Radlinski

Fraunhofer-Institut für
Angewandte Informationstechnik FIT

Experten

Dr. Daniel Trauth

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT

Prof. Wolfgang Prinz, PhD

Leiter des Blockchain Reallabors

Professor an der RWTH Aachen

Stellv. Institutsleiter am Fraunhofer FIT

Leiter für die Abteilung Kooperationssysteme

Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT

Kontakt

Fraunhofer-Institut für Angewandte
Informationstechnik FIT
Schloss Birlinghoven
53757 Sankt Augustin
info@fit.fraunhofer.de
www.fit.fraunhofer.de