

Hochschule Rhein-Waal

Fakultät Kommunikation und Umwelt

Prof. Dr. Frank Zimmer

Sabine Lauderbach

Kryptowährung als Alternative zu herkömmlichem Geld – Aus ökologischer Sicht

Bachelorarbeit

vorgelegt von

Beke Sofie Westermann

Hochschule Rhein-Waal

Fakultät Kommunikation und Umwelt

Prof. Dr. Frank Zimmer

Sabine Lauderbach

Kryptowährung als Alternative zu herkömmlichem Geld – Aus ökologischer Sicht

Bachelorarbeit

im Studiengang

Medieninformatik

Zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science

vorgelegt von

Beke Sofie Westermann

Hafenstraße 24

47198 Duisburg

Matrikelnummer:

26921

Abgabedatum:

17. Januar 2023

Abstract

Seit 2009 das erste Mal der Bitcoin als Open-Source-Software veröffentlicht wurde, sind neue Kryptowährungen stetig dazu gekommen und weiterentwickelt worden. Einige Jahre später folgten Währungen wie Litecoin, Ripple und Ethereum. Inzwischen sind Kryptowährungen im Großteil der Welt legal und gelten in einigen Ländern bereits als offizielles Zahlungsmittel. Betrachtet man die weitere Entwicklung, stellt sich die Frage, ob Kryptowährungen eine funktionierende Alternative zu herkömmlichen Währungen bieten können, und ob diese unter aktuellen ökologischen Bedingungen tragbar wäre. Ziel ist es, die Frage zu beantworten, welche Kriterien Kryptowährungen erfüllen müssten, um weiterhin einen hohen Stellenwert einzunehmen. Es wird eine Literaturrecherche durchgeführt, welche die Funktionsweise und Problematik verschiedener Mining-Konzepte erklärt, und ökologische Daten analysiert. Dabei zeigt sich, dass es Ansätze zu ökologischen Kryptowährungen gibt, die noch in der Entwicklung sind. Kryptowährungen, die diese Aspekte nicht berücksichtigen, werden langfristig als Alternative ökologisch nicht tragbar sein.

Keywords: Kryptowährung, Bargeld, Ökologie, ökologischer Vergleich

Inhalt

1. Einleitung.....	1
1.1. Motivation und Relevanz	1
1.2. Problemstellung.....	1
1.3. Methodik.....	2
1.4. Struktur.....	3
1.5. Problematik	5
2. Grundlagen der Kryptowährung	6
2.1. Ist Kryptowährung eine Währung?.....	6
2.2. Entstehung und Entwicklung.....	6
2.3. Funktionsweise.....	8
2.4. Unterteilungen	9
2.5. Aktuelle Entwicklung.....	11
3. Konsensmechanismen	12
3.1. Proof-of-Work	12
3.2. Proof of Stake.....	14
3.3. Alternativen	15
4. Auswirkungen von Kryptowährung auf die Umwelt	17
4.1. Was bedeutet ökologisch?.....	17
4.2. Was macht Kryptowährung ökologisch schädlich?	20
4.3. Beispiel: Bitcoin	22
4.4. Miningstandorte	23
5. Alternativen zu Bitcoin	28
5.1. Ethereum.....	29
5.2. Solana	29
5.3. Ripple XRP.....	30
5.4. Cardano.....	30
5.5. Polkadot	30
5.6. Dogecoin	31
5.7. Polygon	31
6. Ökologische Daten der größten Kryptowährungen.....	31
6.1. Ökologische Daten des Bitcoins	32
6.2. Ökologische Daten von Ethereum	36
6.3. Ökologischer Vergleich.....	37
6.4. Energiepass	39
7. Gegenüberstellung von Kryptowährung und herkömmlichem Geld.....	45
7.1. Bargeld.....	45
7.2. Wie ökologisch ist die Bargeldproduktion?.....	48
7.3. Vergleich zu Kryptowährungen	50

8. Lösungen und ökologische Zukunftskonzepte	53
9. Fazit: Ist Kryptowährung als Alternative zu herkömmlichem Geld ökologisch tragbar?	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bitcoin Kurs der letzten 30 Tage.....	11
Abbildung 2: Ethereum Kurs der letzten 30 Tage.....	11
Abbildung 3: Anfallender Elektroschrott von Bitcoin Mining.....	33
Abbildung 4: Stromverbrauch vom Bitcoin Netzwerk.....	34
Abbildung 5: Stromverbrauch vom Ethereum Netzwerk.....	36
Abbildung 6: Übersicht über die einzelnen Prozesse des Bargeldzyklus.....	46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kryptowährungen Überblick.....	10
Tabelle 2: Wirkungskategorien der PEF-Methode.....	19
Tabelle 3: Bewertungskategorien von Kryptowährung.....	19
Tabelle 4: Bitcoin ASICs Leistung und Erscheinungsdatum bis Dezember 2018.....	21
Tabelle 5: Kryptowährungen und ihr Konsensmechanismus.....	22
Tabelle 6: Hashrate in Prozent pro Land.....	24
Tabelle 7: Stromquellen der Top fünf Mining Länder.....	26
Tabelle 8: Top 5 der nachhaltigsten Länder für Krypto Mining.....	27
Tabelle 9: Top Mining Länder mit Bewertung für Krypto Mining	28
Tabelle 10: Ergebnisse zu den ökologischen Daten des Bitcoins.....	35
Tabelle 11: Ergebnisse zu den ökologischen Daten von Ethereum.....	37
Tabelle 12: Ökologischer Vergleich zwischen den ausgewählten Kryptowährungen...	39
Tabelle 13: Zusammenfassung des Vergleichs.....	39
Tabelle 14: Bewertungssystem für den Energiepass.....	40
Tabelle 15: Bitcoin Energiepass.....	40
Tabelle 16: Ethereum Pre-Merge Energiepass.....	41
Tabelle 17: Ethereum Post-Merge Energiepass.....	41
Tabelle 18: XRP Energiepass.....	42
Tabelle 19: Cardano Energiepass.....	42
Tabelle 20: Solana Energiepass.....	43
Tabelle 21: Dogecoin Energiepass.....	43
Tabelle 22: Polkadot Energiepass.....	44
Tabelle 23: Polygon Energiepass.....	44
Tabelle 24: Material- und Stromkosten der Bargeldproduktion.....	47
Tabelle 25: Wirkungskategorien der PEF-Methode.....	50

Tabelle 26: Vergleich von Kryptowährung und Bargeld.....	50
Tabelle 27: Ranking aller untersuchten Währungen nach ökologischer Tragbarkeit....	52
Tabelle 28: Bargeld Energiepass.....	52

1. Einleitung

„Bitcoin, Ethereum, Litecoin und Co. wollen mit unserem klassischen Geld das machen, was E-Mails, WhatsApp, Facebook und Co. mit der Post gemacht haben – es weitestgehend ersetzen.“ (Schreder, 2018, S. 8). 2009 sind die ersten Bitcoin Transaktionen gemacht worden. Es folgten 2011 weitere Kryptowährungen wie Litecoin, Ripple und Ethereum (*Eine kurze Geschichte Der Kryptowährungen*, o.D.). Inzwischen gibt es ca. 10.000 verfügbare Kryptowährungen (Statista Research Department, 2022), aber vor allem Bitcoin und Ethereum dominieren den Markt (*Top 100 Kryptowährungen Nach Börsenwert*, o.D.). Ob Kryptowährung das Potential hat herkömmliche Währungen zu ersetzen, hängt nicht nur von sozialen und wirtschaftlichen Aspekten ab. Auch die ökologische Tragbarkeit der Kryptowährungen spielt eine Rolle.

1.1. Motivation und Relevanz

Es gibt bereits zahlreiche Arbeiten, welche sich mit einem Wechsel in der Geldpolitik befassen. Die Ablösung des herkömmlichen Geldes durch Kryptowährung ist seit 2021 nicht mehr nur ein theoretischer Ansatz. El Salvador hat als erstes Land den Bitcoin als offizielles Zahlungsmittel eingeführt (Demmer, 2021). Trotzdem gibt es viel Kritik am neuen Zahlungsmittel. Nicht nur wirtschaftliche und soziale, sondern auch ökologische Aspekte werden kritisiert. Dabei liegt der Fokus zunehmend auf dem Bitcoin.

Der Bitcoin Kurs ist seit Ende 2020 stark angestiegen und fand im Oktober 2021 seinen Höhepunkt (De Best, 2022a). Seit März 2022 sinkt er wieder, beeinflusst damit alle anderen Kryptowährungen (Horch, 2019) und besitzt eine hohe Relevanz, wenn es um die Zukunft der Kryptowährungen geht.

Es zeigt sich, dass Kryptowährungen und vor allem der Bitcoin eine Alternative zum aktuellen Geldsystem bieten könnten. Diese hängt von den oben genannten Aspekten ab.

Es lohnt sich diese Alternative aus ökologischer Sicht zu betrachten. Durch den Klimawandel und die damit verbundene Suche nach alternativer Energieproduktion besitzt das Thema eine hohe Relevanz. Es existieren Lösungsansätze zu diversen ökologischen Konzepten, welche dieses Problem aufgreifen.

1.2. Problemstellung

Beantwortet werden, soll die Frage, ob Kryptowährung als Alternative zu herkömmlichem Geld aus ökologischer Sicht funktionieren kann. Dazu wird in dieser

Arbeit geklärt: In welcher Hinsicht und in welchem Umfang sind Kryptowährungen umweltschädlich? Wie beeinträchtigen Kryptowährungen die Umwelt? Gibt es ökologische Alternativen? Um diese Fragen zu beantworten, werden die Auswirkungen des Minings und der Transaktionen von Kryptowährung auf die Umwelt beschrieben und eine Übersicht ökologischer Daten von Bitcoin und Ethereum geschaffen. Anschließend werden die nach marktkapital gewichtigsten Kryptowährungen untereinander verglichen. Dabei werden die einzelnen Währungen nach den Aspekten: Stromkosten pro Jahr, Stromkosten pro Transaktion und CO2 Ausstoß verglichen. Es wird ausgewertet werden, welche der untersuchten Währungen am umweltfreundlichsten ist. Anschließend wird ein Vergleich zwischen Bargeld und Kryptowährung aufgestellt. Die zuvor herausgearbeiteten ökologischen Aspekte werden auf Bargeldproduktion und -verwaltung bezogen und verglichen.

1.3. Methodik

Um die Forschungsfrage zu beantworten, wird eine reine Literaturrecherche betrieben. Die ausgewählte Literatur befasst sich mit den Grundlagen der Kryptowährungen. Es werden die ökologischen Auswirkungen dieser diskutiert. Zum ökologischen Aspekt der Kryptowährungen, gibt es umfassende Statistiken, die den gesamten Stromverbrauch der letzten Jahre zeigen. Literatur ist online gesucht worden, mithilfe von Google Scholar, IEEE, der Bibliothek der Hochschule und der Duisburger Bibliothek. Dabei ist eine Mischung aus systematischer und unsystematischer Literaturrecherche angewendet worden. Die Quellenarten sind hauptsächlich Bücher, veröffentlichte Paper, Artikel, Studien und Statistiken. Eine häufig genutzte Quelle für Statistiken und Daten ist der Blog Digiconomist. Dieser zeigt Zahlen zu Stromverbrauch, CO2 Ausstoß und Elektroschrott von Bitcoin, Ethereum und Dogecoin und wurde 2004 von Alex de Vries gegründet (*About*, 2022), der bereits einige Publikationen zum Thema ökologische Auswirkungen des Bitcoin verfasst hat. Als weitere Quellen für Statistiken sind der Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index und Statista gewählt worden.

Untersucht werden nur die ersten zwölf Kryptowährungen sortiert nach Marktkapital. Ursprünglich waren es die ersten zehn, aber der Kurs der Währungen schwankte im Verlauf des Rechercheprozesses, sodass entschieden wurde zwei Weitere miteinzubeziehen. Im späteren Vergleich fallen Kryptowährungen ohne eigene Blockchain weg. Da diese die Blockchains anderer Währungen nutzen, können die ökologischen Aspekte nicht auf die untersuchte Währung bezogen werden. Aus den ersten zwölf Kryptowährungen fallen dadurch USD Coin, Tether und Binance Coin raus. BNB fällt ebenfalls wegen zu geringer Datenlage aus dem Vergleich weg. Damit bleiben folgende Kryptowährungen, die im Verlauf untersucht und verglichen werden: Bitcoin,

Ethereum, Ripple XRP, Cardano, Solana, Dogecoin, Polkadot und Polygon. Alle Währungen haben ihre eigene Blockchain und werden unter ausgewählten ökologischen Aspekten verglichen. Ziel des Vergleichs ist das Aufstellen einer Übersicht über die am meisten und am wenigsten ökologischen Kryptowährungen. Untersucht werden dafür insgesamt drei ökologische Aspekte. Diese leiten sich aus einer Metaanalyse ab. Dabei wird nach einer Definition des Wortes ökologisch gesucht und nach Aspekten, die den ökologischen Einfluss beschreiben. Eine wichtige Quelle für die Metaanalyse ist die Beschreibung des Product Environmental Footprint, kurz auch PEF genannt, des Bundesministeriums für Umwelt und die Studien des Crypto Carbon Ratings Institute, auch CCRI genannt. Aus beiden Quellen werden Kriterien abgeleitet, unter denen die Kryptowährungen jeweils sinnvoll untersucht werden können.

Anschließend wird eine vergleichende Analyse durchgeführt. Die Kryptowährungen sollen untereinander und mit dem Bargeld verglichen werden. Dabei werden die zuvor durch die Metaanalyse gewonnenen ökologischen Aspekte jeder Kryptowährung recherchiert und in Tabellenform verglichen. Daraus wird als Ergebnis ein Energiepass für die untersuchten Kryptowährungen angelegt. Dieser Pass bewertet die Währung nach Ökologie (dargestellt durch die genannten ökologischen Aspekte) und Effizienz (Geschwindigkeit und Skalierbarkeit). Dieser Pass könnte beispielsweise verwendet werden von: Nachhaltigen Finanz- und Wirtschaftsunternehmen, Krypto Börsen, die Wert auf Nachhaltigkeit legen oder Börsenmaklern. Für den Vergleich zwischen Kryptowährungen und Bargeld, werden die Aspekte zur Bargeld Bewertung aus einer Life Circle Analyse der niederländischen Zentralbank genommen. Dabei wird der Lebenszyklus des Bargeldes unterteilt in: Produktion, Verwaltung und Entsorgung. Die Datenlage zur Life Circle Analyse Ergebnissen des Bargeldes wird mit den ökologischen Aspekten zu Kryptowährungen verglichen. Daraus werden gemeinsame Aspekte, in denen beide Währungsarten miteinander verglichen werden können, herausgesucht. Diese werden in Tabellenform gegenübergestellt.

1.4. Struktur

Die Arbeit soll zunächst eine Grundlage über Kryptowährungen und deren Funktion vermitteln. Dazu werden die historische Entstehung und die Entwicklung bis heute beschrieben. Folgende Fragen werden geklärt: Worin haben Kryptowährungen ihren Ursprung? Was war die erste Kryptowährung? Welche Kryptowährungen kamen danach und wie entwickelten sie sich bis heute? Anschließend wird ein kurzer Überblick über die technische Funktionsweise der Blockchain gegeben, um ein grobes Verständnis aufzubauen, wie Kryptowährungen funktionieren und um später zu verstehen, weshalb

und wie sich Kryptowährungen auf die Umwelt auswirken. Der Unterschied zwischen Coins und Tokens wird erläutert, dadurch soll klar werden, weshalb im späteren Vergleich einige Währungen nicht miteinbezogen werden. Außerdem werden aktuelle Entwicklungen genannt, die einen Einblick in mögliche, auch nicht ökologische Risiken und Chancen der digitalen Währung geben.

Im zweiten Kapitel zu den Konsensmechanismen werden die beiden bekanntesten Konsensmechanismen erklärt: Proof-of-Work und Proof-of-Stake. Beide Konzepte sind wichtiger Bestandteil der ökologischen Auswirkung und ihr Verständnis wird in späteren Kapiteln vorausgesetzt und aufgegriffen. Neben den Konzepten des Proof-of-Work und Proof-of-Stake werden Alternative Konzepte wie Proof-of-Burn, Proof-of-Authority, Proof-of-Activity, Proof-of-History und Proof-of-Capacity angeschnitten. Diese werden von einigen erwähnten Blockchains genutzt.

Es dann die Auswirkung von Kryptowährung auf die Umwelt erklärt. Unterteilt wird das Kapitel in vier Unterkapitel. Zunächst wird definiert was Auswirkung auf die Umwelt und ökologisch bedeuten. Orientiert wird sich dabei an einer Definition des Gabler Wirtschaftslexikons und an einem Bewertungssystem des Umweltbundesamtes zur Bestimmung des Umwelt-Fußabdrucks. Daraus werden ökologische Aspekte abgeleitet, die später zur Bewertung der verschiedenen Währungen dienen sollen. Diese Aspekte werden im nächsten Unterkapitel direkt auf Kryptowährung bezogen, um zu zeigen, was genau Kryptowährung umweltschädlich macht, und durch was und wie stark diese Aspekte beeinflusst werden. Anhand des Beispiels Bitcoin wird vor allem das Problem des Minings aufgegriffen und das der Miningstandorte.

Um einen Überblick über die Kryptowährungen zu bekommen, die im nächsten Kapitel miteinander verglichen werden, werden die Kryptowährungen Ethereum, Solana, Polkadot, Polygon, Ripple XRP, Cardano und Dogecoin in Unterkapiteln vorgestellt.

Dann folgt die ökologische Analyse der beiden größten Währungen: Bitcoin und Ethereum. Die ökologischen Aspekte aus den Kapiteln zuvor, werden bei beiden Währungen betrachtet und bewertet. Dabei werden Daten zum Stromverbrauch grafisch dargestellt und mit dem Stromverbrauch von Ländern und Alternativen zur digitalen Zahlung verglichen. Im letzten Unterkapitel werden die genannten acht Kryptowährungen untereinander verglichen. Die bisher aufgestellten ökologischen Aspekte werden aufgezählt und gegenübergestellt. Anschließend wird anhand des Vergleichs eine Reihenfolge der Währungen nach Ökologie aufgestellt. Es wird geschaut welche Währung in den meisten Aspekten am besten abschneidet und wie schwer diese Aspekte jeweils wiegen.

Nach dem Vergleich der Kryptowährungen untereinander, folgt ein weiterer Vergleich zwischen Kryptowährung und herkömmlichem Geld. Dieser beschränkt sich auf die niederländische Bargeldproduktion. Die zuvor aufgestellten ökologischen Aspekte werden auf die einzelnen Schritte der Bargeldproduktion und -verwaltung übertragen. Am Ende werden die Währungen Bitcoin, Ethereum und die laut dem Kapitel zuvor, ökologischste Kryptowährung mit den Daten der Bargeldproduktion und -verwaltung verglichen. Es wird ein Überblick geschaffen, um grob zu zeigen, wie stark sich die einzelnen Zahlungsformen und Währungen ökologisch auswirken.

Basierend auf dem Ergebnis zum Vergleich unter den Kryptowährungen werden Lösungen und Zukunftskonzepte vorgestellt, die Kryptowährungen ökologischer machen könnten. Verschiedene Ansätze zu verschiedenen Währungen existieren bereits und wurden teilweise schon umgesetzt.

Abschließend wird die Forschungsfrage beantwortet: Kann Kryptowährung herkömmliches Geld aus ökologischer Sicht ablösen? Hierzu werden die Ergebnisse aus den Vergleichen und Analysen zusammengefasst und bewertet. Es wird gegenübergestellt, welche Aspekte für und welche gegen eine Krypto-Alternative sprechen und wie diese in Zukunft aussehen müsste.

1.5. Problematik

Einige Problematiken kamen während der Quellensuche auf. Geplant war ein Vergleich zwischen Kryptowährungen und den Bankensystemen zu ziehen. In diese sollte sowohl Bargeldproduktion und -verwaltung als auch Stromverbrauch von Bankgebäuden und -servern einbezogen werden. Dazu fehlten Daten. Es gab keine Aussagen zu Serveranzahl oder -stromverbrauch der Banken ebenso wenig zur internationalen oder gesamt europäischen Bargeldproduktion und -verwaltung. Einige Schätzungen dazu existieren, sind aber nicht bestätigt. Deshalb musste der Vergleich zu herkömmlichem Geld kleiner gefasst werden. Es wurde sich auf das niederländische Bargeldsystem beschränkt, zu dem eine umfangreiche Life Circle Analyse existiert.

Ein weiteres Problem war das Zusammentragen der Daten zu einzelnen Kryptowährungen, wie CO₂/CO₂e-Werte, Stromverbrauch pro Transaktion, Gesamtstromverbrauch o.ä.. Oft unterscheiden sich die Angaben in den Quellen. Manche Daten sind veraltet, durch grundlegende Änderungen einer Kryptowährung wie z.B. bei Ethereum durch den Ethereum-Merge. Primär wurde für die Daten auf Studien des CCR1 und Digiconomist zurückgegriffen.

2. Grundlagen der Kryptowährung

Um ein Verständnis für die Auswirkungen von Kryptowährung zu bekommen, müssen zunächst die Grundlagen geklärt werden. Kryptowährungen bezeichnen digitale Währungen, welche auf dem Konzept der Verschlüsselung basieren. Wie die herkömmliche Währung sich in Euro, Dollar oder Rubel unterteilen lässt, ist auch Kryptowährung in Bitcoin, Ethereum, Ripple etc. unterteilbar (Schreder, 2018, S.20). Jede Kryptowährung hat ihre eigene Bezeichnung der einzelnen Zahlungseinheiten. Z.B. nennt sich die Einheit von Ethereum Ether (Schreder, 2018, S.69). Die Bezahlssysteme der digitalen Währung weisen drei Merkmale auf: Sie sind dezentral, verteilt und kryptografisch abgesichert (Bendel, o.D.). Ziel der Kryptowährung ist die bargeldlose, von Zentralbanken unabhängige Bezahlung (Bendel, o.D.).

2.1. Ist Kryptowährung eine Währung?

Um im Weiteren von Kryptowährung als Währung zu sprechen, muss zunächst geklärt werden, was die Definition und Funktionen von Währung sind und ob Kryptowährung diese erfüllt. Laut dem Gabler Wirtschaftslexikon ist Währung als Geld wie folgt definiert: „Geld ist das allgemein anerkannte Tausch- und Zahlungsmittel, auf das sich eine Gesellschaft verständigt hat.“ (Budzinski, o.D.). Da mit Kryptowährungen offiziell gezahlt werden kann und viele große Unternehmen mit Kryptowährungen zahlen und handeln, kann man Kryptowährungen nach der oben genannten Definition als Währung bezeichnen. Laut dem Bundesfinanzministeriums hat Kryptowährung nicht den Status einer gesetzlichen Währung und wird daher von Zentralbanken nicht ausgegeben oder gehandelt (*Entwurf eines BMF-Schreibens*, o.D.). Sie gilt nicht als gesetzliches Zahlungsmittel, wird aber als Tauschmittel akzeptiert und gehandelt und erfüllt damit die Funktion als Währung (*Entwurf eines BMF-Schreibens*, o.D.).

2.2. Entstehung und Entwicklung

Als erfolgreichste Kryptowährung gilt der Bitcoin, gefolgt von Ethereum. Der Bitcoin war die erste Kryptowährung auf dem Markt und dadurch Vorreiter anderer Altcoins. Vor zwei Jahren galt der Bitcoin noch als „[...] unangefochtene Leitwährung im Kryptomarkt [...]“ (Lange, 2020). Seitdem hat sich an dieser Position nichts verändert. Der Bitcoin Kurs bestimmt auch die Entwicklung der Altcoins und ist immer noch die Währung mit dem höchsten Anteil des Marktkapitals (Lange, 2020; *Top 100 Kryptowährungen Nach Börsenwert*, o.D.). Der Höhepunkt des Bitcoin Kurses lag im November 2021 bei einem Preis von ca. 52.000 Euro pro Bitcoin (Rabe, 2022a). Seitdem ist der Kurs wieder abgesunken und gilt seit April 2022 wegen Zinsängsten und dem Ukrainekrieg als

unsicheres Spekulationsobjekt (Janson, 2022). Der Preis für einen Bitcoin ist auf weniger als die Hälfte zurückgegangen, liegt aktuell bei 20.000 Euro (De Best, 2022a) und damit über den Altcoins (*Top 100 Kryptowährungen Nach Börsenwert*, o.D.).

Trotz seiner Bekanntheit war der Bitcoin nicht die erste Idee und Umsetzung einer digitalen Währung. Es existierten schon einige Jahre vor Veröffentlichung des Bitcoins Konzepte zu Kryptowährungen. Davon konnte sich jedoch keine durchsetzen.

Die Basis für Kryptowährungen bildet die Kryptografie. Als erster wichtiger Schritt galt die Veröffentlichung des DES-Algorithmus im Jahr 1976, ein symmetrischer Verschlüsselungsalgorithmus, der die Grundlage für künftige Kryptowährungen war (*Kleine Geschichte Der Kryptowährungen*, 2021). Die ersten Ideen für Kryptowährung wurden mit der vermehrten Nutzung des Internets ab 1994 umgesetzt. Digitale Zahlungsvorgänge sollten ermöglicht werden. Es gab bereits Kreditkarten, aber Zahlungen mit diesen wurden oft aus Skepsis und Mangel an funktionierenden Zahlungsplattformen vermieden (Kent & Bain, 2020, S.30-32). 1998 verfasste David Chaum, ein US-amerikanischer Kryptologe, ein Paper mit dem Titel „Blind signatures for untraceable payments“. In diesem Paper stellt er die Idee eines anonymen elektrischen Zahlungsverfahrens vor. Chaum gründete 1990 das Unternehmen DigiCash, als erstes Unternehmen für digitales Geld, welches sog. Cyberbucks als Währung nutzte (Sawaneh, 2021). Das Unternehmen hielt sich 8 Jahre, bevor es 1998 bankrott ging (Kent & Bain, 2020, S.31). DigiCash war nicht das einzige Unternehmen zu dieser Zeit, das versuchte digitales Geld umzusetzen. Weitere Versuche sind E-Gold, Millicent, First Virtual, CyberCash, b-money, HashCash, BitGold oder CyberCoin (Kent & Bain, 2020, S.31). Keine der Unternehmen konnte sich durchsetzen. Die erste erfolgreiche Kryptowährung gab es erst 2009. Ein Jahr zuvor verfasste jemand unter dem Pseudonym Satoshi Nakamoto ein Paper „Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System“. Ähnlich wie Chaum zuvor, beschrieb Nakamoto das Konzept einer Währung, mit der es möglich war, anonym und digital zu bezahlen. Das Paper beschreibt das Konzept und die Funktionsweise des Bitcoins und der Blockchain. Der Bitcoin wurde 2009 als Open-Source Software veröffentlicht und die ersten Transaktionen wurden gemacht. Mining war im Gegensatz zu heute, auf damaligen Computern erfolgreich möglich und der Wert der Bitcoins war gering. Beispielsweise kaufte Gavin Andresen, ein Software-Entwickler, der später an der Weiterentwicklung des Bitcoins beteiligt war, 10.000 Bitcoin für 50 US-Dollar. Bitcoin blieb bis 2012 die einzige Kryptowährung auf dem Markt. Es entstanden neue Kryptowährungen mit unterschiedlichen Konzepten, sog. Altcoins. 2015 kam es zu einem Boom einiger Altcoins wie z.B. Ethereum. Keine der Altcoins holte den Bitcoin in Wert oder Marktkapital ein. Ab 2017 stieg der Kurs des Bitcoins an, bis er 2020 einen Boom erlebte, der bis 2021 andauerte. Kryptowährungen

werden inzwischen an Börsen gehandelt. Seit der Veröffentlichung des Bitcoins sind Kryptobörsen entstanden. Diese ermöglichen den Handel verschiedener Kryptowährungen. Die Währungen können gekauft, verkauft oder untereinander getauscht werden.

2.3. Funktionsweise

Moderne Kryptowährungen basieren auf einer Blockchain. Eine Blockchain ist ein decentralized payment system, auch DPS (Mita et al., 2019). Sie basiert auf einer Distributed-Ledger-Technologie. Das sind „[...] Datenbanksysteme [...], die eine synchronisierte Verifizierung und Speicherung von Daten in Peer-to-Peer Netzwerken ermöglichen.“ (Bundesnetzagentur, 2021). Das heißt, eingehende Daten in einem Netzwerk werden synchron durch einen bestimmten Mechanismus verifiziert und anschließend gespeichert, sodass keine Manipulation von außerhalb stattfinden kann. Die Art der Verifizierung und Speicherung hängt von der Ausprägung der Distributed-Ledger-Technologie ab. Eine davon kann die Blockchain sein, bei der die eingehenden Daten in einem Block gespeichert werden und diese Blöcke kryptografisch miteinander verkettet werden (Bundesnetzagentur, 2021). Die Blockchain hat drei Eigenschaften. Sie ist dezentral, sicher und skalierbar. Sie findet nicht ausschließlich bei Kryptowährungen Anwendung, sondern wird auch in anderen Bereichen, wie z.B. bei Smart Contracts, dem Kapitalmarkthandel oder in Bereichen der Compliance genutzt (Schlatt et. al., 2016).

Kryptowährungen wie Bitcoin basieren auf einem Peer-to-Peer Netzwerk und können diese Blockchain Technologie nutzen. Dabei werden zwei kryptografische Funktionen genutzt: Die Public-Key Kryptografie und die kryptografische Hash-Funktion (Bundesnetzagentur, 2021). Bei der Public-Key Kryptografie besitzt jeder Teilnehmer im Netzwerk ein Schlüsselpaar. Einen öffentlichen Schlüssel, welcher öffentlich einsehbar ist und zur Identifikation innerhalb des Netzwerkes dient (Bundesnetzagentur, 2021). Er kann mit einer Adresse verglichen werden. An diesen Schlüssel werden z.B. Überweisungen geschickt. Die Informationen bei einer solchen Überweisung werden erst mit dem privaten Schlüssel verschlüsselt. Diesen kennt nur der Besitzer, die Informationen werden so verschlüsselt, dass nur der Besitzer des entsprechenden öffentlichen Schlüssels diese Informationen wieder entschlüsseln kann (Bundesnetzagentur, 2021). Die kryptografische Hashfunktion wandelt eine Zeichenkette in eine neue Zeichenkette mit einer festen Länge um. Das Ergebnis wird Hash-Wert genannt. Für die gleiche Zeichenkette entsteht immer der gleiche Hash-Wert.

Wird im Netzwerk einer Kryptowährung eine Transaktion durchgeführt, werden zunächst Daten mit den Informationen über Empfänger, Sender und Betrag erstellt (Schlatt et. al., 2016). Sender und Empfänger werden beide über den Hashwert ihrer öffentlichen Schlüssel angesprochen. Der Sender signiert die Transaktion, bevor diese an das Netzwerk gesendet wird (Schlatt et. al., 2016). Am Netzwerkknoten wird die Gültigkeit der Transaktionsinformationen überprüft. Sind die Informationen gültig, werden die Informationen in den aktuellen Block geschrieben. In den Blöcken werden alle Transaktionsinformationen gespeichert und zusätzlich ein sog. Block-Header (Schlatt et. al., 2016). Jeder Teilnehmer des Netzwerkes hat zu jedem Zeitpunkt eine aktuelle Kopie der Blockchain und des aktuellen Blockes. Zu diesem Zeitpunkt ist noch kein aktueller Block bestätigt und somit noch nicht Teil der Blockchain. In regelmäßigen Abständen wird dann der aktuelle Block an die Blockchain gekettet. Um Integrität zu sichern und Manipulationen von außerhalb zu vermeiden, muss der Block vor der Verkettung verifiziert werden. Wie diese Verifizierung abläuft, unterscheidet sich je nach Konsensmechanismus. Nach der Verifizierung haben alle Netzwerkteilnehmer eine gleiche Kopie der aktuellen Blockchain vorliegen.

2.4. Unterteilungen

Kryptowährungen haben unterschiedliche Zwecke. Nicht alle sind für den bloßen Zahlungsvorgang gedacht. Sie unterteilen sich in Coins und Tokens. Beide Begriffe beschreiben Einheiten von Kryptowährungen, die sich im Nutzen unterscheiden.

Coins sind Kryptowährungen, die mit einer eigenen Blockchain laufen (Moreland, 2022). Welcher Konsensmechanismus dabei angewendet wird ist nicht relevant. Durch die eigene Blockchain und das eigene Netzwerk sind sie unabhängig von anderen Kryptowährungen. Neben den klassischen Coins wie z.B. Bitcoin oder Ethereum gibt es sog. Stablecoins. Diese besitzen einen Mechanismus, der den Austausch zwischen Fiatgeld und dem Stablecoin reguliert (Mita et al., 2019). Dadurch werden hohe Kursschwankungen vermieden und der Wert des Stablecoin bleibt stabil (Mita et al., 2019). Das Resultat sind Kryptowährungen wie z.B. Tether die einen stabilen Wechselkurs haben. Ihr Wert entspricht pro Einheit ungefähr einem Euro. Stablecoins sind von Kursschwankungen nicht ausgenommen, was durch Beobachtungen erkennbar ist (*Top 100 Kryptowährungen Nach Börsenwert, o.D.*). Durch den Mechanismus sind diese aber deutlich geringer und seltener als bei herkömmlichen Coins.

Tokens besitzen im Gegensatz zu Coins keine eigene Blockchain. Sie können in fremden Netzwerken durch fremde Blockchains erzeugt werden. Tokens leiten sich aus bestehenden Währungen ab (Moreland, 2022). Während Coins für Zahlungsvorgänge

genutzt werden, sollen Tokens den Zugang zu bestimmten Produkten oder Services sichern (Gandal et al., 2021). Sie repräsentieren eine Wertanlage. Tokens können in drei verschiedene Token Arten unterteilt werden (Reinwald, 2022):

Das Payment Token, dessen Zweck die Bezahlung von z.B. Lieferungen oder Dienstleistungen ist (Linder & Dekker, 2020). Es kann alles bezahlt werden. Das Token kann wie eine eigene Währung funktionieren, einen eigenen Kurs haben und an der Börse gehandelt werden, wie z.B. Tether, Binance Coin oder USD Coin (*Top 100 Kryptowährungen Nach Börsenwert, o.D.*).

Das Utility Token, ein Token zur Vergabe von Berechtigungen, um Leistungen zu beanspruchen oder an bestimmte Zugangsrechte zu gelangen (Linder & Dekker, 2020).

Das Debt Token, das die Funktion von z.B. Darlehen erfüllt (*Entwurf eines BMF-Schreibens, o.D.*). Es sichert eine Rückzahlung eines vorher investierten Betrages zu (*Entwurf eines BMF-Schreibens, o.D.*).

Oder das Security Token, auch Wertpapier-Token genannt. Es dient Investitionszwecken, und gibt dem Nutzer das Recht an einer Beteiligung am Gewinn z.B. einer Währung oder an einem bestimmten Vermögen (Linder & Dekker, 2020).

Tabelle 1: Kryptowährungen Überblick basierend auf *Top 100 Kryptowährungen nach Börsenwert o.D.; Top-Stablecoin-Tokens nach Marktkapitalisierung, o.D.*

Währung	Abkürzung	Art der Währung
Bitcoin	BTC	Coin
Ethereum	ETH	Coin
Tether	USDT	Stablecoin-Token
USD Coin	USDC	Stablecoin-Token
BNB	BNB	Coin
Binance USD	BUSD	Stablecoin-Token
XRP	XRP	Coin
Cardano	ADA	Coin
Dogecoin	DOGE	Coin
Polygon	MATIC	Coin
Polkadot	DOT	Coin

Die Kryptowährungen, welche in den folgenden Kapiteln behandelt werden, sind alle Coins (siehe Tabelle 1). Sie haben ihre eigene Blockchain. Die Stablecoin-Token wie Tether, USD Coin und Binance Coin laufen auf fremden Blockchains. Sie nutzen fremde Ressourcen. Daher kann ihr Verbrauch an Ressourcen wie Strom schwer gemessen werden. Somit fallen die Stablecoin-Token in der späteren Betrachtung weg.

2.5. Aktuelle Entwicklung

Die Entwicklung vieler Kryptowährungen ist aktuell negativ. Nicht nur der Bitcoin Kurs ist die letzten Tage gesunken, sondern auch viele der Altcoin Kurse. Folgende Grafiken zeigen die Kursentwicklung von Bitcoin und Ethereum der letzten 30 Tage:

Abbildung 1: Bitcoin Kurs der letzten 30 Tagen



Quelle: Aktueller Bitcoin Kurs (BTC), 2022

Abbildung 2: Ethereum Kurs der letzten 30 Tage



Quelle: Aktueller Ethereum Kurs (ETH), 2022

Betrachtet man die Kurse von Bitcoin und Ethereum (siehe Abbildung 1 und 2), fällt auf, dass beide Kurse etwa ab dem 07.11.2022 sanken. Ab dem 11.11.2022 ist ein erneuter Einbruch nach einer kurzen Erholung erkennbar. Ein Grund dafür ist die Insolvenz der FTX-Börse. Schuld daran war die Vergabe von Vermögenswerten in Form von Krediten an die Schwester Firma Alameda Research, was zum Abzug von Vermögenswerten durch Kunden führte (Kaulartz & Holl, 2022). Nach der Insolvenzanmeldung der Börse am 11.11.2022 sind nicht nur in den Kursen von Bitcoin und Ethereum (siehe Abbildung 1 und 2) Einbrüche zu verzeichnen, sondern auch bei anderen Altcoins (*Kryptobörse FTX meldet Insolvenz an*, 2022). Der Bitcoin hat dadurch den niedrigsten Kurs seit zwei

Jahren erreicht (*Kryptobörse FTX meldet Insolvenz an*, 2022), was sich auf Investoren auswirkt. El Salvador beispielsweise, das erste Land, das den Bitcoin als öffentliches Zahlungsmittel zugelassen hat, hat durch den Kurseinbruch finanzielle Verluste und Schulden gemacht (*FTX-Insolvenz und Bitcoin-Einbruch*, 2022). Laut Kaulartz und Holl zeigt dieser Vorfall, dass es Regulierungen beim Handel mit Kryptowährungen geben muss (Kaulartz & Holl, 2022).

Die aktuelle Entwicklung äußert sich negativ. Kurseinbrüche und die Insolvenz der Kryptobörse FTX zeigen Zweifel bei Investoren.

3. Konsensmechanismen

Ein Konsensmechanismus findet Anwendung in verteilten Systemen, in denen jeder Teilnehmer eine identische Kopie von z.B. einer Datenbank benötigt (Metzger, o.D.). Diese Eigenschaft trifft auf die Netzwerke von Kryptowährungen zu. Sie sind verteilte Systeme, in denen jeder Teilnehmer zu jeder Zeit eine aktuelle Kopie der Blockchain besitzen muss (siehe Kapitel 2.2.). Der Mechanismus kann bestimmen, wie neue Coins entstehen und wie neue Blöcke und Transaktionen generiert und abgewickelt werden. Beschreiben werden kann die Funktion des Konsensmechanismus wie folgt: „Ein Konsensmechanismus [...] bezeichnet einen Algorithmus, der eine Einigung über den Status eines Netzwerkes zwischen seinen Teilnehmern erzielt.“ (Metzger, o.D.). Wie diese Einigung erfolgt, unterscheidet sich je nach Konsensmechanismus. Zwei gängige Mechanismen sind Proof-of-Work und Proof-of-Stake. Neben diesen beiden Konsensmechanismen gibt es noch Weitere. Einige davon wie Proof-of-Burn, Proof-of-Authority, Proof-of-History, Proof-of-Activity und Proof-of-Capacity werden in Kapitel 3.3. genauer erklärt.

3.1. Proof-of-Work

Der Proof-of-Work Mechanismus ist durch den Bitcoin verbreitet und dient oft als Grundlage für andere Konsensmechanismen (siehe Kapitel 3.3.). Er wurde bereits 1993 entwickelt und später von Satoshi Nakamoto für den Bitcoin adaptiert und weiterentwickelt (Avasthi & Saxena, 2018). Der ursprüngliche Zweck des Proof-of-Work Mechanismus war, das Erschweren des Versendens von Spam E-Mails (Avasthi & Saxena, 2018). Vor dem Versenden einer E-Mail musste eine komplexe Rechenaufgabe gelöst werden. Diese Lösung verbraucht Rechenleistung und Zeit. Dadurch erhöht sich der Aufwand für das Versenden von Spam E-Mails ebenso wie die Anzahl an E-Mails, die gesendet werden können. In einem Peer-to-Peer Netzwerk einer Kryptowährung wie z.B. dem Bitcoin hat der Proof-of-Work Mechanismus eine ähnliche Aufgabe. Dort

werden nach einer bestimmten Zeit alle Transaktionen in einer Liste, welche als Block bezeichnet wird, zusammengefasst (Christoph, o.D.). Bevor ein Block verifiziert und an die Blockchain gehängt werden kann, muss entschieden werden, welcher Netzwerkteilnehmer diesen Block erstellt. Dazu muss der Block durch eine Aufgabe gelöst werden. Hierzu wird Mining betrieben. Das heißt alle Netzwerkteilnehmer, die den Block erstellen und verifizieren wollen, Miner genannt, müssen einen sog. Nonce erraten, auch numbers only used once genannt (Moreland, 2019). Der Nonce Wert wird mit dem Header des vorherigen Blocks kombiniert und gehasht. Ist das Ergebnis dieses Hashvorgangs kleiner oder entspricht gleich dem Zielwert, gilt der aktuelle Block als gelöst, wird verifiziert und der Blockchain hinzugefügt (Moreland, 2019). Der Miner, der den entsprechenden Nonce Wert gefunden hat erhält eine Belohnung. In diesem Prozess sind zwei Faktoren entscheidend: Difficulty und Halving (Günther & Dutschmann, 2017).

Die Difficulty beschreibt die Schwierigkeit der Berechnung der Hashwerte. Der Zielwert, welcher durch das Hashen von Nonce Wert und Header erreicht oder unterschritten werden muss, wird ebenfalls durch die Difficulty festgelegt (Moreland, 2019). Mit steigender Rechenleistung muss auch die Difficulty steigen und so angepasst werden, dass alle 10 min ein Block gelöst wird (Günther & Dutschmann, 2017). Die Rechenleistung im Netzwerk wird nicht nur durch Hardware bestimmt. Der Anteil der Netzwerkteilnehmer die Mining betreiben, stellen ebenfalls Rechenleistung zur Verfügung (Heintz, 2022). Je mehr Teilnehmer im Netzwerk sind, desto höher muss die Difficulty sein.

Das Halving ist die Halbierung der Belohnung nach jeweils 210.000 Blöcken, welche an den Miner für das Finden des passenden Nonce Wertes ausgezahlt wird (Günther & Dutschmann, 2017).

Nicht nur die Bitcoin Blockchain nutzt einen Proof-of-Work Mechanismus, sondern auch Kryptowährungen wie Dogecoin, Litecoin, Monero oder Ethereum Pre-Merge (*Top 100 Kryptowährungen Nach Börsenwert*, o.D.). Ein Mining Programm ist auf jedem Computer installierbar. Der Erfolg des Minings wird bestimmt durch die Rechenleistung. Diese wird wiederum beeinflusst durch die Leistung der Hardware. Durch die Installation eines Mining Programms, wird automatisch am jeweiligen Netzwerk der Kryptowährung teilgenommen. Durch viele Teilnehmer wird dem Netzwerk Rechenleistung zur Verfügung gestellt und eine hohe Integrität gesichert. Als einzelne Privatperson ist es seit dem Bitcoin Boom unwahrscheinlich durch Mining an Coins zu kommen. Durch große Zusammenschlüsse zu sog. Mining Pools von z.B. Unternehmen fällt die eigene Rechenleistung als Privatperson verhältnismäßig gering aus. Eine Alternative ist beispielsweise das Cloud Mining. Hierbei zahlt eine Privatperson für einen Anteil an einer

Serverfarm (Schreder, 2018, S.53-57). Andere Möglichkeiten sind der Aufbau einer eigenen Serverfarm oder Handel über entsprechende Handelsplattformen (Schreder, 2018, S.53-57). Mining ist inzwischen eine eigene Branche mit eigenen Unternehmen geworden. Diese betreiben den Handel, Umtausch und Mining der Währung. Die größten Unternehmen im Bereich des Bitcoin sind: BTC.com, AntPool, Poolin und F2Pool (*Was Sind Mining-Pools Und Wie Funktionieren Sie?*, o.D.).

Die Nachteile des Proof-of-Work Mechanismus sind unter anderem die langsame Verarbeitung von Transaktionen. Der Bitcoin hat beispielsweise eine Rate von maximal 7 Transaktionen pro Sekunde, Dogecoin kann bis zu 40 Transaktionen pro Sekunde verarbeiten (Finkler, 2022). Verglichen mit Altcoins wie Solana, die aktuell bis 5000 Transaktionen (*Skalierbare Blockchain-Infrastruktur*, o.D.) pro Sekunde schaffen sind Bitcoin und Dogecoin langsam. Außerdem entsteht durch das Mining ein hoher Stromverbrauch und Elektroschrott. Die Serverfarmen laufen durchgehend. Und durch die steigende Difficulty wird immer mehr Rechenleistung benötigt. Umgekehrt steigt die Teilnehmeranzahl und die Rechenleistung neuer Hardware, wodurch die Difficulty angepasst werden muss. Durch die großen Zusammenschlüsse von Minern, ist Mining als Privatperson nicht mehr so erfolgreich wie vor dem Bitcoin Boom.

Der Proof-of-Work Konsensmechanismus hat auch Vorteile. Er bietet beispielweise eine hohe Sicherheit vor Angriffen. Das große Netzwerk und die hohe Teilnehmerzahl fördern die Integrität. Werden einzelne Teilnehmer manipuliert, hat das keine Auswirkungen auf das gesamte Netzwerk. Manipulationen müssten in deutlich größerem Ausmaß stattfinden.

3.2. Proof of Stake

Eine Alternative zum Proof-of-Work Mechanismus ist Proof-of-Stake, die 2011 erstmals eingeführt wurde (Leys, 2021). Die Kritik an zu hohem Stromverbrauch durch Miningnetzwerke gibt es bei Proof-of-Stake nicht. Ein Blockchain Netzwerk, das mit Proof-of-Stake Blöcke validiert, hat einen geringeren Stromverbrauch, benötigt kein Mining und produziert keinen Elektroschrott durch Abnutzung von Mining Hardware. Statt Minern gibt es sogenannte Validatoren oder Staker, die bereits einen bestimmten Betrag oder Einsatz in die Kryptowährung investiert haben (Hupel, 2021). Wird ein neuer Block gebildet, muss einer der Staker ausgewählt werden, der diese Aufgabe übernimmt (Hupel, 2021). Anschließend stimmen die anderen Staker per Mehrheitsentscheid über die Gültigkeit des Blockes ab (Hupel, 2021). Ist der Block gültig, wird eine Belohnung an den Staker, der den Block erstellt hat, ausgezahlt. Sollte der Block als nicht gültig erklärt werden, verliert der jeweilige Staker seinen Einsatz (Hupel, 2021).

Ethereum nutzt ebenfalls Proof-of-Stake. Es gibt einen Einsatz von 32 Ether um Staker zu werden. Das entspricht bei einem Kurs von aktuell 1.509,89 Euro ca, 48.316 Euro. Staking kostet als Einzelperson also entsprechend viel. Alternativen bietet Staking als Service oder in Zusammenschlüssen, die in Form von Teilbeträgen finanziert werden (*Staking Mit Ethereum*, o.D.). Weitere Währungen die Proof-of-Stake als Konsensmechanismus nutzen sind Cardano, Polkadot, Solana und Algorand.

Auch der Proof-of-Stake Mechanismus hat Nachteile. Um sein Stimmrecht als Staker zu behalten, muss ständig investiert werden. Das Konzept „die Reichen werden immer Reicher“ ist oft ein Kritikpunkt an Proof-of-Stake. Nutzer mit vielen Coins haben durch Proof-of-Stake hohe Chancen noch mehr Coins zu bekommen. Die Chancenvergabe ist unfair. Auch Betrug ist nicht ausgeschlossen. Wie bei Proof-of-Work besteht ab einem Anteil von 51% die Möglichkeit der Manipulation. Macht eine Person einen Anteil von 51% der Staker aus, ist es ihr theoretisch möglich falsche Blöcke zu validieren (Leys, 2021).

Der Konsensmechanismus bietet ebenso Vorteile. Im Netzwerk ist, wie bereits erwähnt, weniger Rechenleistung nötig als in Proof-of-Work Netzwerken (Leys, 2021). Hoher Stromverbrauch und Elektroschrott fallen weg. Dadurch entsehende Investitionen für Staker fallen ebenfalls weg. Durch Lösungen wie Staking-Zusammenschlüsse kann jeder am Staking teilnehmen. Außerdem bietet der Proof-of-Stake Mechanismus durch hohe Skalierbarkeit und Geschwindigkeit eine höhere Rate der Transaktionen pro Sekunde.

3.3. Alternativen

Neben Proof-of-Work und Proof-of-Stake gibt es noch andere Konsensmechanismen. Nicht immer wird nur ein Konsensmechanismus für die Blockchain einer Kryptowährung eingesetzt. In manchen Fällen werden die Mechanismen kombiniert. Ein Beispiel eines alternativen Konsensmechanismus ist Proof-of-Burn. Er basiert auf dem gleichen Konzept wie Proof-of-Work, jedoch wird keine hohe Rechenleistung benötigt (Kaucher, 2022). Nach dem Erwerb von Coins, können Rechte zur Erstellung neuer Blöcke erworben werden, indem sogenannte Mining-Rigs gekauft werden (Kaucher, 2022). Diese Mining-Rigs simulieren Mining-Hardware (Kaucher, 2022). Mit diesen virtuellen Mining-Rigs können die Coins der jeweiligen Währung nach dem Proof-of-Work Mechanismus erworben werden. Es wird virtuelles Mining betrieben. Die Mining-Rigs werden langsamer und nutzen sich, wie Mining-Hardware, nach einiger Zeit ab (Kaucher, 2022). Nach Abnutzung eines Mining-Rigs muss ein neues Rig gekauft werden. Der Vorteil gegenüber des Proof-of-Work Mechanismus, liegt in der Vermeidung von

Elektroschrott und zu hoher Rechenleistung. Die Coins zum Erwerben der Mining-Rigs werden anschließend vernichtet (Kaucher, 2022). Dieser Vorgang wird auch als Verbrennung des investierten Coins bezeichnet (Kaucher, 2022), wodurch sich der Name Proof-of-Burn ableitet. Genutzt wird dieser Konsensmechanismus von den Kryptowährungen Slimcoin, Counterparty und Factom (*What Is Proof of Burn (PoB)?*, 2020).

Eine weitere Alternative bietet Proof-of-Activity, eine Mischung aus den Mechanismen von Proof-of-Stake und Proof-of-Work (Kaucher, 2022). Hierbei muss der Teilnehmer eine Rechenaufgabe erfüllen, um anschließend ein Block-Template zu erstellen (Kaucher, 2022). Dieses Template wird durch einen Proof-of-Stake ähnlichen Vorgang validiert (Kaucher, 2022). Erst dann wird der Block nach Template Vorlage erstellt. Vorteil des Proof-of-Activity ist die hohe Sicherheit und die faire Chancenvergabe durch den doppelten Validierungsvorgang (Kaucher, 2022). Der Mechanismus bietet zusätzlich eine hohe Sicherheit. Durch die von Proof-of-Work und Proof-of-Stake ist die Chance eines 51% Angriffes sehr unwahrscheinlich. Da aber für die Lösung der Proof-of-Work Aufgabe hohe Rechenleistung nötig ist, ist der Stromverbrauch genau wie beim klassischen Proof-of-Work sehr hoch.

Neben Proof-of-Burn und Proof-of-Activity gibt es den Proof-of-Authority Konsensmechanismus. Dieser hat eine ähnliche Funktionsweise wie Proof-of-Stake. Die Auswahl wer Staker ist, entscheidet nicht die Summe der investierten Coins, sondern die Identität (Avasthi & Saxena, 2018). Hierzu wird ein Bewerbungsprozess durchlaufen. Nur bestimmte Teilnehmer sind dazu berechtigt Blöcke zu erzeugen (Alt, 2021). Das schließt eine Chancenvergabe aufgrund von Vermögen aus, ist aber keine anonyme Lösung.

Auch Proof-of-History ist ein weiterer Konsensmechanismus, den beispielsweise Solana verwendet. Dabei muss keine komplexe Rechenaufgabe gelöst werden, um Blöcke zu erzeugen, sondern es werden parallel und permanent Blöcke erzeugt (Waldvogel, 2022). Die Blöcke, die Transaktionen beinhalten, werden gespeichert und später an die Blockchain geknüpft (Waldvogel, 2022).

Zuletzt wird der Konsensmechanismus Proof-of-Capacity vorgestellt. Hierbei bestimmt die Menge des zur Verfügung gestellten Speicherplatzes, wer den Block generiert (Alt, 2021). Ein Beispiel zur Nutzung des Mechanismus ist die Kryptowährung Burstcoin (Alt, 2021). Vorteil ist hierbei, dass der Mechanismus energieeffizient ist und kein Mining betrieben wird.

4. Auswirkungen von Kryptowährung auf die Umwelt

Nach Beschreibung der Grundlagen, kann sich mit der Frage auseinandergesetzt werden, wie Kryptowährungen sich auf die Umwelt auswirken. Dazu müssen die zu dieser Frage relevanten ökologischen Daten betrachtet werden. Es muss definiert werden was ökologisch bedeutet und welche Aspekte als Bewertungskriterien in Frage kommen.

4.1. Was bedeutet ökologisch?

Ökologisch beschreibt laut Duden „die Wechselbeziehung zwischen Lebewesen und ihrer Umwelt [...]“ (Duden, o.D.). Es stellt sich die Frage, was diese Wechselbeziehung beeinflusst und wie Kryptowährung bzw. die Nutzung von Kryptowährung mit dieser zusammenhängt und unter welchen daraus abgeleiteten ökologischen Aspekten Kryptowährungen untersucht und bewertet werden können.

Es existieren bereits Methoden zur Bewertung der Umweltbelastung. Eine davon ist die Bewertung durch den Product Environmental Footprint, kurz auch PEF genannt, die 2013 von der europäischen Kommission veröffentlicht wurde (Finkbeiner, Bach & Lehmann, 2018). Bewertet werden sollen die „[...] Umweltauswirkungen von Produkten und Dienstleistungen durch auftretende Stoff- und Energieflüsse [...]“ (Finkbeiner, Bach & Lehmann, 2018). Hierzu wird zunächst eine funktionelle Einheit definiert, die die Funktion, die Qualität, die Menge und die Haltbarkeit des zu betrachtenden Produktes beschreibt (Finkbeiner, Bach & Lehmann, 2018). Anschließend wird die Produktkategorie festgelegt ebenso wie ein repräsentatives Produkt (Finkbeiner, Bach & Lehmann, 2018). Es folgen die Modellierung des Produktsystems und die Wirkungsabschätzung in vorgegebenen Wirkungskategorien (Finkbeiner, Bach & Lehmann, 2018).

Die Methode ist nicht direkt auf Kryptowährung anwendbar, da diese theoretisch weder ein Produkt noch eine Dienstleistung ist. Zudem können nicht alle Parameter der einzelnen Schritte der PEF-Methode auf Kryptowährung angewendet werden. Formell stuft das Finanzamt Kryptowährungen als Wirtschaftsgut ein (BSI, o.D.). Damit ist es ein Vermögenswert, der aber nur digital existiert. Für die PEF-Methode kann keine funktionelle Einheit definiert werden, anders als bei den Pilotprojekten. Hier wurden Produkte wie Flüssigwaschmittel, Papier, Metallbleche, T-Shirts, Bier, Milchprodukte oder Kaffee betrachtet (Finkbeiner, Bach & Lehmann, 2018).

Der dritte Schritt der PEF-Methode, die Wirkungsabschätzung, beinhaltet Wirkungskategorien, die verschiedene Arten der Umweltbelastung darstellen. Einige

dieser Umweltbelastungen werden durch Kryptowährungen erzeugt. Tabelle 2 zeigt alle Wirkungskategorien. Es wurden Wirkungskategorien markiert, auf die die Kryptowährung Einfluss hat. Der zu Ursprung/ Grund des Einflusses auf diese Wirkungskategorie steht in der Spalte daneben (siehe Tabelle 2).

Kryptowährung hat Einfluss auf den Klimawandel, da CO₂/CO₂e ausgestoßen wird. Das wirkt sich durch Klimaerwärmung aus und fällt somit in die Kategorie Klimawandel. Auch die Ressourcennutzung von Mineralien und Metallen ist betroffen. Für die Nutzung von Kryptowährung wird Hardware benötigt, die teilweise aus seltenen Metallen hergestellt wird. Der Abbau dieser Metalle wirkt sich durch Humantoxizität und Euthrophierung negativ auf die Umwelt aus. Die fossile Ressourcennutzung spielt bei der Stromerzeugung eine Rolle. Kryptowährung benötigt nicht nur Hardware, sondern auch Strom. Dieser kommt aus verschiedenen Energiequellen, darunter auch fossile Brennstoffe. Auch Landnutzung und Wasserverbrauch spielen bei Kryptowährungen eine Rolle. Serverfarmen beispielsweise stehen in großen Hallen und müssen gekühlt werden. Dafür wird Wasser von außerhalb genutzt. Da nicht zu allen Wirkungskategorien genaue Daten vorhanden sind, werden diese im Folgenden zu Bewertungskategorien für Kryptowährung zusammengefasst.

Tabelle 2: Wirkungskategorien der PEF-Methode basierend auf: Finkbeiner, Bach & Lehmann, 2018

Wirkungskategorie	Ursprung
Klimawandel, gesamt	CO ₂ e/CO ₂ -Ausstoß durch Stromverbrauch
Klimawandel, biogen	-
Klimawandel, Landnutzung und Transformation	-
Stratosphärischer Ozonabbau	-
Humantoxizität, krebserregend und nicht-krebserregend	Herstellung von Hardware
Feinstaub	-
Ionisierende Strahlung	-
Bildung von fotochemischem Ozon	-
Versauerung, terrestrisch	-
Eutrophierung, terroristisch	Herstellung von Hardware
Eutrophierung, Frischwasser	Herstellung von Hardware
Eutrophierung, marin	Herstellung von Hardware
Landnutzung	-
Wasserverbrauch	Kühlungssysteme der Server
Ressourcennutzung, Mineralien und Metalle	Verbrauch von Elektroschrott
Ressourcennutzung, fossil	Nutzung von Stromquellen

Die einzelnen Aspekte der Kryptowährungen, die später untersucht werden sollen, müssen aus den Wirkungskategorien in Tabelle 2 abgeleitet werden. Beispielsweise kann die Ressourcennutzung von Mineralien und Metallen nicht im Einzelnen pro Metall oder Mineral betrachtet werden. Für diese Ressourcennutzung, die Humantoxizität, den Wasserverbrauch und die Eutrophierung von Frischwasser wird daher stellvertretend die Produktion von Elektroschrott betrachtet. Da die Herstellung der Hardware diese verursacht. Der Klimawandel wird durch CO₂e/CO₂-Ausstoß und Stromverbrauch beschrieben. Und die fossile Ressourcennutzung ebenfalls durch Stromverbrauch und Stromquellen. Aus den ausgewählten Kategorien lassen sich diese drei Bewertungskategorien ableiten, die direkt auf Kryptowährung bezogen werden können. Tabelle 3 zeigt diese Bewertungskategorien und deren Unterteilungen:

Tabelle 3: Bewertungskategorien von Kryptowährungen abgeleitet aus den Kategorien aus Tabelle 2

Bewertungskriterien	Unterteilung
Stromverbrauch	Pro Jahr
	Pro Transaktion
Elektroschrott	Pro Jahr
	Pro Transaktion
CO ₂ e/CO ₂ -Ausstoß	-

Betrachtet werden der Stromverbrauch einer Kryptowährung pro Jahr und pro Transaktion, der entstehende Elektroschrott und der CO₂e/CO₂-Ausstoß (siehe Tabelle 3). Daraus lässt sich schließen: Kryptowährungen, die ökologisch sein wollen, benötigen niedrigen Stromverbrauch, erneuerbare Energiequellen, keine fossilen Verbrennungsquellen, keinen oder geringen Anfall von Elektroschrott und geringen bis gar keinen CO₂e/CO₂-Ausstoß.

4.2. Was macht Kryptowährung ökologisch schädlich?

Nachdem die zu untersuchenden ökologischen Bewertungskategorien herausgearbeitet wurden, soll geklärt werden wodurch Kryptowährung Einfluss auf diese nimmt. Die Ressourcennutzung von Materialien und Mineralien wird, wie bereits in Kapitel 4.1. erwähnt, von Elektroschrott repräsentiert. Elektroschrott entsteht sobald Hardware benötigt wird. Diese Hardware sind Geräte im Netzwerk einer Kryptowährung. Je nach Funktionsweise unterscheidet sich die Art und die Aufgabe der Geräte. Kryptowährungen die mit dem Konsensmechanismen Proof-of-Work funktionieren, also Mining mit echter Hardware betreiben, haben nicht nur die privaten Computer der Teilnehmer als Hardware zu verzeichnen, sondern auch Mining Geräte. Diese Geräte sind auf Mining spezialisiert und kurzlebig (Breithut, 2021), sogenannte Application Specific Integrated Circuit Geräte, kurz auch ASICs (Potor, 2021). Die Geräte müssen produziert und wieder entsorgt werden. Die ökologische Problematik beginnt mit der Produktion. Als Vorprodukte werden Rohstoffe wie z.B. Gold und Kupfer benötigt (Zehle, Arndt & Bormann, 2007). Diese sind nicht nur selten, sondern müssen in ökologisch schädlichen Prozessen gewonnen werden. Laut WWF werden beispielsweise für den Goldabbau giftige Chemikalien wie Arsen, Quecksilber oder Zyanid eingesetzt, die Luft und Gewässer verschmutzen (*Gold – alles andere als glänzend für die Umwelt*, 2022). Auch bei Lebewesen in näheren Umgebungen von Goldminen, wie Fische konnte eine Schwermetallbelastung festgestellt werden (*Gold – alles andere als glänzend für die Umwelt*, 2022). Mit Metallabbau gehen nicht nur ökologische Probleme einher, sondern auch soziale und wirtschaftliche (*Gold – alles andere als glänzend für die Umwelt*, 2022). Neben dem Abbau von Gold wirkt sich auch der Abbau von Metallen wie Stahl, Aluminium, Kupfer oder Nickel negativ auf die Umwelt aus (*Mining: Die Folgen des weltweiten Rohstoffabbaus*, 2019). Nicht nur die Produktion der ASICs, sondern auch die Entsorgung dieser ist problematisch. Es gibt einen ständigen Austausch der Hardware, durch die steigende Rechenleistung. Ca. alle 1,3 Jahre kommt ein neues ASIC Gerät mit mehr Leistung auf den Markt (Potor, 2021). Werden beispielsweise die ASICs für Bitcoin Mining der Jahre 2016 bis 2018 betrachtet, fällt auf, dass pro Jahr bis

zu drei neue Geräte erschienen sind, deren Rechenleistung über die Jahre steigt (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Bitcoin ASICs Leistung und Erscheinungsdatum bis Dezember 2018
basierend auf: de Vries, 2019

Maschine	Hersteller	Hashrate (TH/s)	Energieeffizienz (J/TH)	Erscheinungsdatum
Antminer S15	Bitmain	28	57	Dezember 2018
AvalonMiner 821	Canaan	11	109	Februar 2018
Antminer T9+	Bitmain	10,5	127	Januar 2018
Bitfury B8	Bitfury	47	130	Dezember 2017
AvalonMiner 761	Canaan	8,8	150	Juli 2017
AvalonMiner 741	Canaan	7,3	160	April 17
Antminer T9	Bitmain	12,5	126	Januar 2017
Antminer S9	Bitmain	14	98	Juni 2016
Antminer S7	Bitmain	4,73	273	September 15
Antminer S5	Bitmain	1,155	510	Dezember 2014
Antminer S4	Bitmain	2	690	September 14

Alte Geräte werden trotz bestehender Funktionalität ausgetauscht. Falsche Entsorgung dieser Geräte führt zu toxischer Verschmutzung von Boden und Grundwasser (Breithut, 2021). Die Entstehung von Elektroschrott bei Kryptowährung ist ein ökologisches Problem, was primär durch Mining entsteht. Dieses hängt mit dem Konsensmechanismus und dessen Umsetzung zusammen.

Neben der Ressourcennutzung von Metallen und Mineralien sind die fossile Ressourcennutzung und der CO₂e/CO₂-Ausstoß genannt worden. Diese werden durch die Verbrennung von fossilen Stoffen beeinflusst. Der Stromverbrauch spielt bei diesem Aspekt die tragende Rolle. Jede Blockchain benötigt Strom. Die eben genannte Hardware benötigt ebenfalls Strom. Umso mehr Rechenleistung ein Netzwerk braucht, desto mehr Hardware und desto mehr Strom benötigt es. Auch hier ist der Konsensmechanismus entscheidend. Kryptowährungen mit Proof-of-Work, wie Bitcoin, bestehen aus großen Mining Netzwerken, die einen hohen Stromverbrauch haben. Stromverbrauch ist erstmal, aus ökologischer Sicht, nicht problematisch. Es kommt auf

die Stromproduktion an. Miner orientieren sich bei der Wahl des Standortes für eine Miningfarm an Strompreisen und Ökologischen Standards eines Landes (Samford & Domingo, 2019). Es wird kein Fokus auf den ökologischen Anteil gelegt, z.B. wie hoch der Anteil an erneuerbaren Energien ist. Dadurch, dass beim Betrieb einer Serverfarm durch Wartung, Hardwareanschaffung und Stromverbrauch regelmäßige Kosten anfallen, müssen diese wieder durch Ersparnisse in anderen Bereichen eingeholt werden. Somit ist auch eine hohe Menge an verbrauchtem Strom negativ zu bewerten.

Einfluss auf die ausgewählten ökologischen Aspekte nimmt der Konsensmechanismus und der Aufbau des Netzwerks einer Kryptowährung. Bei Proof-of-Work wurden bereits einige ökologische Nachteile erläutert. Ein hoher Stromverbrauch, durch ein großes Mining Netzwerk, hoher Hardwareverbrauch, durch steigende Rechenleistung und Difficulty und die Orientierung an Ländern mit niedrigen Strompreisen und schwachen ökologischen Regelungen. Doch viele der größeren Kryptowährung nutzen Proof-of-Work nicht (siehe Tabelle 5). Trotzdem haben die Währungen, die Proof-of-Work nutzen einen hohen ökologischen Einfluss durch ihre Größe und Teilnehmerzahl wie z.B. Bitcoin.

Tabelle 5: Kryptowährungen und ihr Konsensmechanismus basierend auf: *Bitcoin*, o.D.; *Ethereum* o.D.; *BNB*, o.D.; *Cardano*, o.D.; *Polygon*, o.D.; *Polkadot*, o.D.; *Was ist Ripple (XRP)*, o.D.

Währung	Konsensmechanismus
Bitcoin	Proof-of-Work
Ethereum	Proof-of-Stake
Tether	-
USD Coin	-
BNB	Byzantinische Fehlertoleranz
Binance USD	-
XRP	HashTree
Cardano	Proof-of-Stake
Dogecoin	Proof-of-Work
Polygon	Proof-of-Stake
Polkadot	Nominated Proof-of-Stake

4.3. Beispiel: Bitcoin

Der ökologische Einfluss wird anhand eines Beispiels gezeigt. Dafür eignet sich der Bitcoin. Der Bitcoin ist nicht nur die erste erfolgreichste Währung, sondern auch die größte, gemessen an Marktkapital (*Bitcoin*, o.D.). Die Bitcoin Blockchain funktioniert mit

dem Konsensmechanismus Proof-of-Work. Das heißt, um neue Bitcoins zu generieren, muss Mining betrieben werden. Im November 2022 befanden sich 19,22 Millionen Bitcoins im Umlauf (Rabe, 2022b). Der Anstieg ist seit dem Mai 2020 abgeschwächt (Rabe, 2022b), was an steigender Difficulty durch eine erhöhte Anzahl an Netzwerkteilnehmer liegen kann. Auch die Blockgrößen und die Anzahl der monatlichen Transaktionen sind seit Veröffentlichung des Bitcoins angestiegen (*Block Size*, o.D.). Bis Anfang des Jahres 2022 sind im Bitcoin Netzwerk etwa 707 Millionen Transaktionen gemacht worden und die Währung hat ein Marktkapital von ca. 318 Milliarden Euro (*Top 100 Kryptowährungen Nach Börsenwert*, o.D.). Trotz des hohen Marktkapitals ist der Bitcoin Kurs die letzten Monate gesunken und damit seit 2021 so niedrig wie noch nie (*Bitcoin*, o.D.).

Es gibt auch Kritik am Bitcoin. Durch das große Mining Netzwerk, hat die Kryptowährung einen hohen Stromverbrauch und CO₂ Ausstoß (siehe Kapitel 6.1.). Außerdem unterliegt Bitcoin, wie auch andere Kryptowährungen, dem Trilemma Problem. Dabei kann die Blockchain einer Kryptowährung nur maximal zwei von drei Eigenschaften erfüllen (Longchamp, 2020). Diese sind: Dezentralität, Sicherheit und Skalierbarkeit (Longchamp, 2020). Der Fokus von Bitcoin liegt dabei auf Dezentralität und Sicherheit. Das hat zur Folge, dass im Bitcoin Netzwerk maximal sieben Transaktionen pro Sekunde abgewickelt werden können (Schuster, 2022). Zudem haben die Transaktionen mit 1430,2 kWh im Gegensatz zu anderen Währungen einen hohen Stromverbrauch (siehe Kapitel 6.3.). Beim Bitcoin wirkt sich der Konsensmechanismus und das dadurch notwendige Mining ökologisch aus. Beides verbraucht Strom und Hardware, die ständig zur Verfügung stehen müssen.

4.4. Miningstandorte

Die Problematik des Bitcoin-Minings liegt nicht nur im Prozess selbst, sondern auch in der Standortwahl. Je nach Standort der Mining Farmen unterscheidet sich die Art der Stromgewinnung, was Auswirkungen auf den Ressourcenverbrauch von fossilen Materialien hat. Entsprechend dem Anteil der erneuerbaren Energien können einige Länder als Mining Standort ökologischer sein als andere. Umso größer der Anteil an erneuerbaren Energien ist, umso geringer ist der Anteil an fossilen Brennstoffen, was die Stromerzeugung und damit den Stromverbrauch bei Kryptowährungen weniger umweltschädlich macht. Bei der Standortwahl müssen die entstehenden Kosten für die Mining Hardware, den Stromverbrauch und den Platz für die Server geringgehalten werden. Mögliche Faktoren zur Standortwahl könnten die Lage, Umweltregelungen, Mining Gesetze und Strompreise sein. Die Lage beschreibt den Ort im Land, an dem die Server Farm steht. Nähe zu Gewässern kann die Kühlung erleichtern, ebenso wie kalte

Regionen. Die Umweltauflagen im Land sind relevant, da zusätzliche Kosten und Aufwand zur Einhaltung bestimmter Regeln aufkommen könnten. Das gleiche gilt für die Beachtung von Mining Gesetzen im Land. Beispielsweise hat der US-Bundesstaat New York ein temporäres Mining-Verbot für Mining mit Stromquellen aus fossilen Brennstoffen ausgesprochen (Bode, 2022). Ein anderes Beispiel ist der Crackdown in China, 2021. Ab diesem Jahr wurde Mining in China offiziell verboten (Hoppmann, 2022). Andere Länder in denen Mining verboten oder zum Teil verboten ist, sind Marokko, Algerien, Nepal, Bangladesch, Kirgistan, Paraguay und Ecuador (Rehberg, 2022). Das letzte Kriterium, die Strompreise, bestimmt wie viel Kosten ein Miner zum Betrieb seiner Mining Farm zahlen muss. Sind die Strompreise zu hoch, senkt das den Gewinn und erhöht die Kosten.

Die Standortwahl hat sich über die letzten Jahre verändert. Bis 2021 war China der top Standort, gemessen an der durchschnittlichen monatlichen Hashrate (*Bitcoin Mining Map*, 2022). Die Verteilung änderte sich nach dem Crackdown 2021. Die Verteilung im Januar 2022 wird in Tabelle 6 dargestellt. Erfasst werden hierbei nur Länder, deren Anteil größer ist als 0,1%. Die Daten zu Deutschland und Irland sind verfälscht, da es dort keine größeren Mining Unternehmen oder Zusammenschlüsse gibt. Ursprung dieser Prozente könnten VPNs oder Proxy Dienste sein (*Bitcoin Mining Map*, 2022).

Tabelle 6: Hashrate in Prozent pro Land basierend auf: *Bitcoin Mining Map*, 2022

Land	Mining Prozent ab 0,1%
USA	37,84%
China	21,11%
Kasachstan	13,22%
Kanada	6,48%
Russland	4,66%
Deutschland	3,06%
Irland	1,97%
Schweden	0,84%
Norwegen	0,74%
Brasilien	0,33%
Niederlande	0,21%
Frankreich	0,21%
Island	0,16%
Ukraine	0,15%
Paraguay	0,15%
Italien	0,11%
Mexico	0,11%

Das Top Mining Land sind die USA mit 37,84%. Nach dem Crackdown in China 2021, verlagerten sich viele Miner dorthin (*Bitcoin Mining Map, 2022*). China ist trotz des Crackdown mit 21,11% an zweiter Stelle und hat damit immer noch einen großen Anteil am weltweiten Mining. Ebenfalls über 10% liegt Kasachstan. Damit sind die USA, China und Kasachstan die drei größten Mining Länder. Der Rest der Prozente verteilt sich weltweit. Nur Kanada, Russland, Deutschland und Irland haben einen Anteil, der 1% übersteigt.

Es fällt auf, dass die Strompreise der Top drei Mining Länder gering sind. In den USA werden pro kWh ca. 12 Cent gezahlt, in China ca. 7 Cent (*Weltweite Strompreise: Deutscher Strom Mit Am Teuersten, 2021*) und in Kasachstan ca. 4 Cent (*Kasachstan Strompreise, 2022*). Zum Vergleich: In Deutschland werden 2021 ca. 31 Cent gezahlt (*Weltweite Strompreise: Deutscher Strom Mit Am Teuersten, 2021*). Um zu bewerten, wie ökologisch Mining in diesen Ländern ist, wird der Anteil der verschiedenen Stromquellen verglichen. In Tabelle 7 sind die Stromquellen der fünf größten Mining Länder aufgelistet:

Tabelle 7: Stromquellen der Top fünf Mining Länder basierend auf: *Canada, o.D.; Kazakhstan, o.D.; People's Republic of China, o.D.; United States, o.D.; Russia, o.D.*

Land	Energiequellen	Prozentsatz	
USA	Fossil	59,20%	76,50%
	Kernenergie	17,30%	
	Wind	10,40%	23,40%
	Wasserkraft	7,00%	
	Solar	4,40%	
	Geothermie und Biokraft	1,60%	
China	Fossil	64,30%	68,90%
	Kernenergie	4,60%	
	Wasserkraft	15,70%	31,20%
	Wind	8,90%	
	Solar	5,20%	
	Geothermie und Biokraft	1,40%	
Kasachstan	Fossil	89,50%	89,50%
	Wasserkraft	8,00%	10,60%
	Wind	1,50%	
	Solar	1,10%	
Kanada	Fossil	18,92%	32,02%
	Kernenergie	13,10%	
	Wasserkraft	59,70%	67,90%
	Wind	5,90%	
	Solar	0,90%	
	Biokraft	1,40%	
Russland	Fossil	61,00%	81,00%
	Kernenergie	20,00%	
	Wasserkraft	18,20%	18,70%
	Wind	0,50%	

Die Tabelle zeigt die fünf größten Mining Länder und ihre Stromgewinnungsart in Prozent. Es werden nur diese Länder aufgelistet, da die Datenlagen von Deutschland und Irland durch Nutzung von VPNs und Proxy Services (*Bitcoin Mining Map, 2022*) verfälscht ist und die restlichen Länder einen zu geringen Prozentsatz der Hashrate ausmachen. Es werden fossile Verbrennungen und Kernenergie zusammengefasst. Diese gelten als umweltunfreundliche Stromquellen, da CO₂ ausgestoßen wird und im Fall von Kernenergie radioaktiver Abfall entsteht, der sich negativ auf Ökologie und Lebewesen auswirkt. Darunter werden erneuerbare Energiequellen wie Wasserkraft,

Windenergie, Solarenergie, Biokraftenergie und Geothermie zusammengefasst. Vier der fünf Mining Länder nehmen ihren Strom überwiegend aus fossilen Brennstoffen und Kernenergie (siehe Tabelle 7). Kanada bildet eine Ausnahme. Es bezieht seinen Strom aus fast 68% erneuerbaren Energiequellen (siehe Tabelle 7).

Zusammenfassend ist Mining in den genannten Ländern nicht ökologisch, da überwiegend nicht-erneuerbare Energiequellen genutzt werden, die einen hohen Anteil an Kohle und Erdöl verbrennen. Es gibt jedoch Länder, in denen Mining ökologischer wäre als in den fünf genannten. Vor allem in skandinavische Länder wie Norwegen und Island könnte Mining umweltfreundlicher sein, da dort höhere Anteile an erneuerbaren Energien, wie z.B. Geothermie und Windkraft genutzt werden (Heintz, 2022). Alonso et al. haben eine Bewertung der einzelnen Länder vorgenommen, um zu zeigen, welches sich aus ökologischer Sicht für Mining eignet. Dabei sind folgende Variablen für die einzelnen Länder untersucht worden: Produktion aus erneuerbaren Energiequellen, Strompreis, jährliche Temperaturen, Gesetze und Regelungen zum Mining, Forschungs- und Entwicklungskosten, Humankapital und eine Bewertung zu Nachhaltigkeit eines Landes (Alonso et al., 2021). Aus diesen Variablen wird der Index berechnet, der in Form einer Zahl die Nachhaltigkeit eines Landes für Krypto Mining beschreibt. Sie sind zu folgendem Ergebnis gekommen:

Tabelle 8: Top 5 der nachhaltigsten Länder für Krypto Mining basieren auf: Alonso et al., 2021

Land	Nachhaltigstes Land für Krypto Mining Index
Dänemark	87
Deutschland	82,3
Schweden	78,3
Süd-Korea	77,2
Schweiz	77

Laut Alonso et al. liegen die nachhaltigsten Länder überwiegend in Europa. Nur Dänemark und Deutschland erreichen einen Index-Wert über 80. Betrachtet werden in Tabelle 8 nur die ersten fünf Länder, um mit Tabelle 7 einen direkten Vergleich zu den vorherigen Ergebnissen zu ziehen. In Tabelle 9 ist der Index Wert der zuvor untersuchten Mining Länder aufgelistet.

Tabelle 9: Top Mining Länder mit Bewertung für Krypto Mining basierend auf: Alonso et al., 2021

Land	Nachhaltigstes Land für Krypto Mining Index
USA	67
China	57,5
Kasachstan	47
Kanada	69,7
Russland	54,7

Die USA, China, Kanada und Russland kommen auf einen Index Wert von knapp über 50. Kanada wird mit dem höchsten Index Wert bewertet und ist damit aus diesen fünf Ländern das nachhaltigste Land, um Krypto Mining zu betreiben. Das geht auch aus den vorherigen Ergebnissen hervor. Kanada besitzt einen großen Anteil erneuerbarer Energiequellen, niedrige Temperaturen, die Kühlung und Belüftung der Serverhallen erleichtern und Flüsse und Seen, aus denen lokal Kühlwasser genommen werden kann. Die USA haben einen Index Wert, der geringer ist als der von Kanada. Trotz des geringen Anteils an erneuerbaren Energiequellen liegt dieser bei 67. Dieser kommt durch die hohe Bewertung beim Humankapital und der Nachhaltigkeit des Landes zu Stande (Alonso et al., 2021). Kasachstan wird in beiden Kategorien niedrig bewertet. Tabelle 7 zeigt, dass das Land einen niedrigen Anteil an erneuerbaren Energien hat. Gleiches gilt für Russland. Hier ist der Index Wert höher als bei Kasachstan, da das Land niedrigere Temperaturen hat und eine höhere Bewertung der Nachhaltigkeit.

Es zeigt sich, dass die aktuellen großen Mining Länder im Mittelbereich einer ideal ökologischen Lösung liegen. Nach Alonso et al. gibt es nachhaltigere Länder um Mining zu betreiben und die aktuellen Länder liegen im mittleren der Bewertung (siehe Tabelle 9). In allen Ländern, bis auf Kanada, wird der Strom überwiegend aus fossilen Brennstoffen und Kernenergie gewonnen. Damit sind Mining und der Stromverbrauch, der dadurch entsteht, aus ökologischer Sicht negativ zu bewerten.

5. Alternativen zu Bitcoin

Nicht alle Währungen benötigen Mining, um zu funktionieren. Und neben dem Bitcoin gibt es ca. 10.000 andere Kryptowährungen (Statista Research Department, 2022). Der Großteil der untersuchten Altcoins nutzt andere Konsensmechanismen (siehe Tabelle 5) als der Bitcoin. Im Folgenden werden die nach Marktkapital größten Altcoins vorgestellt, um einen Überblick zu schaffen. Es wurden die ersten zwölf

Kryptowährungen nach Marktkapital ausgewählt. Ursprünglich sollten nur die ersten zehn ausgewählt werden, dabei veränderte sich die Verteilung des Marktkapitals während der Recherche, sodass zwei zusätzliche Kryptowährungen ausgewählt wurden. Alle Tokens und der Coin BNB sind dabei ausgenommen. Tokens sind für die spätere ökologische Analyse ungeeignet durch die fehlende eigene Blockchain. Der Coin BNB hat eine mangelnde ökologische Datenlage.

5.1. Ethereum

Ethereum (ETH) ist ein Coin (siehe Tabelle 1), dessen Einheit Ether genannt wird. Der Coin wurde 2013 entwickelt und zwei Jahre später in Umlauf gebracht (De Best, 2022b). Neben dem Bitcoin ist Ethereum die zweitgrößte Kryptowährung gemessen am Marktkapital (*Top 100 Kryptowährungen Nach Börsenwert*, o.D.). Es sind ca. 122 Millionen Ether in Umlauf, damit gibt es mehr Ether als Bitcoin (De Best, 2022b). Wie andere Kryptowährungen nutzt Ethereum eine Blockchain. Das Ethereum Netzwerk funktioniert mit einer Ethereum virtual Machine, kurz EVM (Wackerow, 2022). Diese führt Anfragen zu Berechnungen und Transaktionen aus. Dadurch ändert sich ihr Zustand, welcher dann in der Blockchain gespeichert wird (Wackerow, 2022). Ethereum ist mit sogenannten Smart Contracts programmierbar. Diese ermöglichen beispielsweise automatisierte Überweisungen (Schreder, 2018, S.70).

Die Ethereum Blockchain funktionierte vor dem Merge wie Bitcoin mit Proof-of-Work. Im September 2022 fand der Ethereum-Merge statt. Während des Merges wurde die Blockchain von Proof-of-Work auf Proof-of-Stake umgestellt. Eine weitere geplante Veränderung ist die Implementierung des Shardings im nächsten Jahr, was die Durchsatzrate der Transaktionen pro Sekunde von aktuellen 15 steigern soll (Ashmore, 2022). Vor dem Ethereum-Merge konnten Ether, genau wie Bitcoin, durch Mining erworben werden. Dadurch hatte das Ethereum Netzwerk einen ähnlich hohen Stromverbrauch wie Bitcoin (siehe Kapitel 6.2.). Dieser konnte durch den Merge gesenkt werden (*Ethereum Energy Consumption Index*, 2022).

5.2. Solana

Solana (SOL) mit der Einheit Sol ist ein Coin, der Proof-of-History in Kombination mit Proof-of-Stake nutzt (Rathmann, 2022). Dadurch schafft die Solana Blockchain bis zu 5.000 Transaktionen pro Sekunde. Da Solana noch ein relativ neues Netzwerk ist, treten noch Fehler bei Transaktionen und Sicherheit auf (Rathmann, 2022). Solana selbst wirbt mit ökologischen Projekten und Partnerschaften (*Environment Solana*, o.D.)

5.3. Ripple XRP

Ripple (XRP) unterscheidet sich von den bisher genannten Kryptowährungen. Es ist nicht dezentral, da die Kryptowährung von dem Unternehmen Ripple Labs kontrolliert wird, welche einen Großteil der Coins besitzt (Schreder, 2018, S.77). Einige Coins wurden bei Veröffentlichung von Ripple von dem Unternehmen in Umlauf gebracht (Schreder, 2018). Aktuell sind 50 Milliarden davon in Umlauf (*Top 100 Kryptowährungen Nach Börsenwert*, o.D.). Ripples Blockchain funktioniert mit dem Konsensmechanismus HashTree (siehe Tabelle 4). Die Kryptowährung kann also nicht durch Mining gewonnen werden. Im Ripple Netzwerk können 1.500 Transaktionen pro Sekunde abgewickelt werden. Genutzt wird Ripple hauptsächlich von Unternehmen und Banken zum Verschicken größerer Geldmengen (Schreder, 2018, S.77). Laut Schreder ist diese Nutzung problematisch, da die Gefahr der Zentralisierung durch Banken und Finanzunternehmen besteht (Schreder, 2018, S.77).

5.4. Cardano

Cardano (ADA) mit der Einheit Ada, ist 2017 wie Bitcoin als Open-Source-Projekt veröffentlicht worden. Inzwischen sind 32 Milliarden Coins in Umlauf (*Top 100 Kryptowährungen Nach Börsenwert*, o.D.). Die Kryptowährung funktioniert mit Proof-of-Stake (*Cardano*, o.D.). Der Proof-of-Stake Mechanismus wird zusammen mit Ouroboros genutzt, ein Proof-of-Stake Protokoll, das die Sicherheit und Nachhaltigkeit der Blockchain steigern soll (*Ouroboros*, 2022). Die Betreiber hinter Cardano sagen aus, dass Ouroboros das Netzwerk auch energieeffizienter mache (*Ouroboros*, 2022). Es soll 4 Millionen Mal energieeffizienter sein als Bitcoin (*Ouroboros*, 2022) und schafft ca. 250 Transaktionen pro Sekunde.

5.5. Polkadot

Polkadot (DOT) wurde 2017 als Open-Source-Software veröffentlicht. Eine Einheit nennt sich Dot. Polkadot nutzt eine veränderte Form des Proof-of-Stake, Nominated Proof-of-Stake genannt und ist wie Ethereum in der Lage Smart Contracts zu nutzen (*Was ist Polkadot*, o.D.). Die Blockchain von Polkadot hat einen Aufbau, der sich von herkömmlichen Blockchains unterscheidet. Es gibt eine zentrale Blockchain, die Relay Chain, an welcher andere parallele Chains anknüpfen (*Was ist Polkadot*, o.D.). Geplant ist, eine Nested Relay Chain, um beliebig viele parallele Chains zu erstellen (*Was ist Polkadot*, o.D.). Durch die parallele Nutzung von mehreren Chains, besitzt die Kryptowährung eine hohe Skalierbarkeit (*Was ist Polkadot*, o.D.) und dadurch eine hohe

Anzahl an Transaktionen pro Sekunde. Aktuell liegt der Wert bei 1.000 Transaktionen pro Sekunde.

5.6. Dogecoin

Dogecoin (Doge) ist ein Coin, der auf einem Internet Meme basiert und 2013 von Litecoin geforkt wurde (*Dogecoin, o.D.*). Eine Einheit nennt sich Doge. Gemessen am Marktkapital steht Dogecoin auf Platz acht der Kryptowährungen (*Top 100 Kryptowährungen Nach Börsenwert, o.D.*). Aktuell sind 132 Milliarden Doges in Umlauf (*Top 100 Kryptowährungen Nach Börsenwert, o.D.*). Dogecoin funktioniert wie Bitcoin mit Proof-of-Work. Um an Coins zu gelangen kann Mining betrieben werden. Im Gegensatz zu Bitcoin schafft die Dogecoin Blockchain mehr Transaktionen pro Sekunde. Während bei Bitcoin maximal sieben Transaktionen pro Sekunde erreicht werden, sind bei Dogecoin 30 Transaktionen pro Sekunde möglich.

5.7. Polygon

Die Kryptowährung Polygon (MATIC) wurde 2017 als Projekt gestartet und 2019 an der Börse Binance eingeführt (*Was ist Polygon, o.D.*). Sie dient neben ihrer Funktion als Kryptowährung auch als Skalierungslösung für andere Währungen (*Was ist Polygon, o.D.*). Das heißt Polygons Blockchain ist mit anderen Währungen und Smart Contracts kompatibel. Transaktionen anderer Kryptowährungen könnten auf der Polygon Blockchain schneller und günstiger als auf ihrer eigenen Blockchain abgewickelt werden (*Was ist Polygon, o.D.*). Zurzeit sind ca. 8 Milliarden Polygon Coins in Umlauf (*Top 100 Kryptowährungen Nach Börsenwert, o.D.*).

6. Ökologische Daten der größten Kryptowährungen

Im Folgenden werden die ökologischen Daten der Kryptowährungen aufgeführt. Zunächst werden die beiden nach Marktkapital größten Kryptowährungen Ethereum und Bitcoin genauer betrachtet. Dabei wird der Verbrauch von Ressourcen durch die einzelnen Währungen gezeigt. Wie hoch dieser Verbrauch ist, kann je nach Quelle variieren. Es werden die ökologischen Aspekte in Form von Grafiken und Berechnungen gezeigt. Anschließend werden die in Kapitel 5 beschriebenen Kryptowährungen miteinander verglichen und als Energiepass nach Ökologie und Leistung bewertet.

6.1. Ökologische Daten des Bitcoins

Wie bereits in Kapitel 4.3. erwähnt, ist der Bitcoin die größte Währung nach Marktkapital und Kurs. Durch den Marktanteil und den in den letzten Jahren steigenden Kurs hat das Netzwerk viele Teilnehmer. Die Bitcoin Blockchain funktioniert mit Proof-of-Work. Das heißt unter den Netzwerkteilnehmern befinden sich Miner. Das Mining hat hohen Strom- und Hardwareverbrauch zur Folge.

Es existieren verschiedene Daten zur Menge des durch Bitcoin Mining entstehenden Elektroschrotts. Die Hauptquellen sind hierbei der Block Digiconomist und ein Artikel von de Vries und Stoll, in dem der Elektroschrott des Bitcoin Mining thematisiert wird. Laut de Vries und Stoll erzeugt das Bitcoin Mining ca. 30,7 Kilotonnen Elektroschrott im Jahr (de Vries & Stoll, 2021). Um das Ergebnis in Gramm pro Transaktion auszudrücken, werden die 30,7 Kilotonnen in Gramm umgerechnet:

$$30,7 \text{ kt} = 30.700.000.000 \text{ g}$$

Um den jährlichen Wert auf eine Transaktion herunterzurechnen, wird dieser durch die Anzahl aller Transaktionen pro Jahr dividiert. Die durchschnittliche Anzahl der Transaktionen pro Tag beträgt laut der Seite Cryptolist 269.583 (*Bitcoin Statistik*, o.D.). Auf ein Jahr hochgerechnet:

$$269.583 * 365 = 98.397.795 \text{ Transaktionen pro Jahr}$$

Es wird anschließend der entstehende Elektroschrott pro Transaktion berechnet. Dadurch ergibt sich folgender Wert:

$$30.700.000.000 \text{ g} / 98.397.795 \text{ Transaktionen im Jahr} = 312,01 \text{ g pro Transaktion}$$

Laut eigener Berechnung mit den Zahlen von de Vries und Stoll als Grundlage, verursacht eine Bitcoin Transaktion ca. 328 g Elektroschrott. Die Daten des Blogs Digiconomist sind höher. Digiconomist zufolge verbraucht eine Bitcoin Transaktion ca. 448 g Elektroschrott. Die Differenz entsteht durch unterschiedliche Datenlagen zu verschiedenen Zeitpunkten. Die Zahl zum jährlich anfallenden Elektroschrott von Bitcoin liegt laut Digiconomist bei 42,68 Kilotonnen. Der Blog zeigt aktuelle Zahlen. Abbildung 3 stellt dar, wie sich die Menge des anfallenden Elektroschrotts Anfang 2017 bis Ende 2022 entwickelt hat. Bis Juni 2021 ist der anfallende Elektroschrott angestiegen (siehe Abbildung 3), ebenso der Bitcoin Kurs. Auffällig ist ein Einbruch im Juni 2021. Zu dieser Zeit war der Mining Crackdown in China. Mining wurde verboten. Während der Monate Juli und August gab es in China kein Mining (*Bitcoin Mining Map*, 2022). Da China bis zum Juni 2021 der größte Mining Standort gemessen an der Hashrate war, wirkte sich der Crackdown auf Stromverbrauch (siehe Abbildung 4) und anfallenden Elektroschrott des gesamten Bitcoin Netzwerkes aus. Nach dem Crackdown steigt die Zahl des

anfallenden Elektroschrott wieder an und hat 2022 durch die Inflation in den USA im Juni 2022 (Imöhl, 2022) erneut einen Tiefpunkt. Da sich ein Großteil des Minings nach dem Crackdown in die USA verlegt hat, hatte die Inflation entsprechende Auswirkungen. Nach der Kurssenkung durch die Inflation erreicht die Anzahl des anfallenden Elektroschrotts Ende 2022 ihren Höhepunkt.

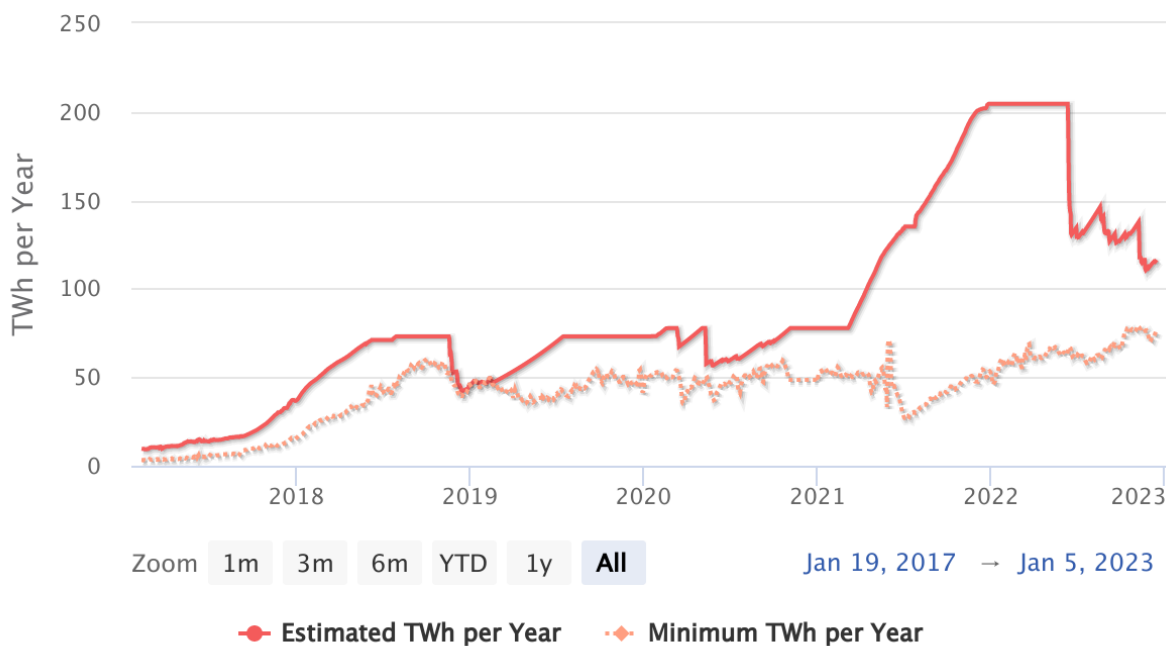
Abbildung 3: Anfallender Elektroschrott von Bitcoin Mining



Quelle: *Bitcoin Electronic Waste Monitor*, 2022

Ein weiteres Problem des Bitcoins ist der hohe Stromverbrauch. Dieser lässt sich jährlich und pro Transaktion betrachten. Stromverbrauch entsteht durch Mining, die hohe Netzwerkaktivität, eine hohe Hashrate und die damit verbundene steigende Difficulty. In Abbildung 4 wird die Entwicklung des Stromverbrauchs von 2017 bis Ende 2022 gezeigt:

Abbildung 4: Stromverbrauch vom Bitcoin Netzwerk



BitcoinEnergyConsumption.com

Quelle: *Bitcoin Energy Consumption Index*, 2022

Bei Betrachtung des jährlichen Stromverbrauchs in Abbildung 4 fällt auf, dass dieser durch den Crackdown in China im Juni 2021 kaum sank. Zu erkennen ist ein Einschnitt zu diesem Zeitpunkt, der kaum einen Monat anhält. Mitte 2022 sinkt der Stromverbrauch erneut, durch die Inflation in den USA, die Insolvenz mehrerer Krypto Börsen und die Diskussion eines Krypto Mining Verbots der europäischen Zentralbank (Imöhl, 2022). Im Jahresübergang zwischen 2021 und 2022 war der Stromverbrauch der Kryptowährung mit 204,5 TWh (*Bitcoin Network Power Demand*, 2022) auf dem Höhepunkt (siehe Abbildung 4). Aktuell liegt der Stromverbrauch laut dem Blog Digiconomist bei 116 TWh (*Bitcoin Network Power Demand*, 2022) und laut Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index bei ca. 91 TWh . Damit ist der Stromverbrauch seit Anfang 2022 nach beiden Schätzungen gesunken (siehe Abbildung 4).

Der Stromverbrauch pro Transaktion beträgt aktuell laut dem Blog Digiconomist 1223,07 kWh (*Bitcoin Network Power Demand*, 2022). Das ist ein vielfaches an Strom, der für die Transaktionen anderer Kryptowährungen oder Visa Transaktionen benötigt wird (De Best, 2022c).

Neben Elektroschrott und Stromverbrauch, ist auch der CO₂e/CO₂-Ausstoß durch seine Wirkung auf den Klimawandel als ökologische Bewertungskategorie bestimmt worden. Das Bitcoin Netzwerk produziert ebenfalls CO₂e/CO₂. Der Wert entsteht durch hohen Stromverbrauch, da zur Stromproduktion überwiegend fossilen Brennstoffe genutzt werden (siehe Tabelle 7). Wie der Wert zum anfallenden Elektroschrott, unterscheidet sich auch der CO₂e/CO₂-Wert je nach Quelle. Während der Cambridge Bitcoin

Electricity Consumption Index den jährlichen CO₂e/CO₂-Ausstoß des Bitcoins aktuell auf ca. 46 MtCO₂e schätzt (*Bitcoin Greenhouse Gas Emissions, 2022*), schätzt Digiconomist den CO₂e/CO₂-Ausstoß mit ca. 64 MtCO₂e höher ein (*Bitcoin Greenhouse Gas Emissions, 2022*). Der Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index gibt ebenfalls Schätzungen zu einem Coal-only Szenario und zu einem Hydro-only Szenario ab. Das sind Szenarien, die die Bitcoin CO₂e/CO₂-Daten für den Fall beschreiben, dass zur Stromerzeugung nur Kohleverbrennung oder nur Wasserkraft genutzt wird. Der Wert läge im Fall des Coal-only Szenario bei ca. 91 MtCO₂e, im des Hydro-only Szenario läge er bei 1,91 MtCO₂e (*Bitcoin Greenhouse Gas Emissions, 2022*).

1,91 MtCO₂e = 4,14% von 46,17 MtCO₂e, d.h. 95,86 weniger MtCO₂e (mit der Schätzung des Cambridges Bitcoin Electricity Consumption Index)

1,91 MtCO₂e = 2,94% von 64,89 MtCO₂e, d.h. 97,06 weniger MtCO₂e (mit der Schätzung des Blogs Digiconomist)

Ein kompletter Umstieg auf erneuerbare Stromquellen, wie beispielsweise Wasserkraft beim Bitcoin Mining, könnte den CO₂e/CO₂-Ausstoß um ca. 95% bis 97% senken. Auch der hohe Stromverbrauch würde dadurch an Problematik verlieren, da keine fossilen Brennstoffe mehr benötigt werden würden. Zwei der drei ökologischen Bewertungskategorien aus Tabelle 3 könnten ökologischer bewertet werden als bisher. Elektroschrott würde weiterhin anfallen. Damit wäre das Problem des Mining immer noch nicht gelöst.

Tabelle 10 fasst die Ergebnisse zusammen. Dabei sind die ökologischen Untersuchungskriterien aus Tabelle 3 aufgelistet und in Bezug auf den Bitcoin ausgefüllt worden:

Tabelle 10: Ergebnisse zu den ökologischen Daten des Bitcoins

Bewertungskriterien	Unterteilung	Bitcoin
Stromverbrauch	Pro Jahr	91-116 TWh
	Pro Transaktion	1223,07 kWh
Elektroschrott	Pro Jahr	30-42 kt
	Pro Transaktion	328-448 g
CO ₂ e/CO ₂ -Ausstoß	-	46-64 MtCO ₂ e

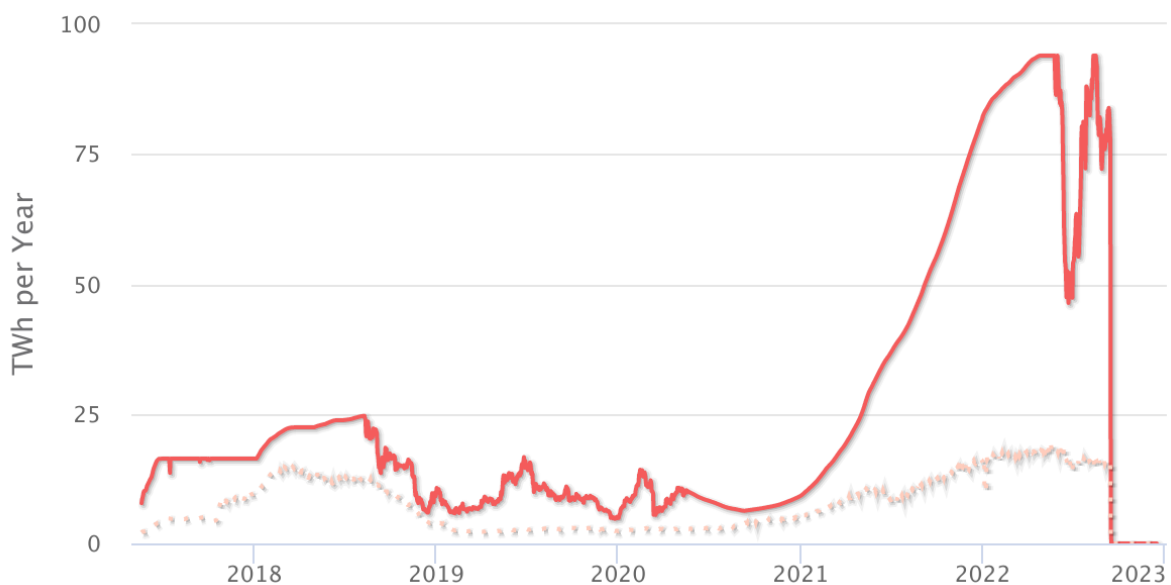
6.2. Ökologische Daten von Ethereum

Ethereum ist neben Bitcoin die zweitgrößte Kryptowährung nach Marktkapital (*Top 100 Kryptowährungen Nach Börsenwert*, o.D.). Im Gegensatz zu Bitcoin funktioniert die Ethereum Blockchain seit dem Ethereum-Merge mit Proof-of-Stake. Seitdem können Ether nicht mehr durch Mining erworben werden. Durch den Ethereum-Merge wird deutlich, wie sehr der Konsensmechanismus Einfluss auf die ökologische Wirksamkeit hat.

Der erste Kritikpunkt des Bitcoins in Kapitel 6.1., der anfallende Elektroschrott, ist durch den Ethereum-Merge bereits gelöst. Durch das Fehlen von Mining, wird keine Mining Hardware benötigt. Produktion, Kauf, Inbetriebnahme und Entsorgung dieser fällt weg. Die Nutzer des Ethereum Netzwerkes benötigen Hardware um Überweisungen zu tätigen und im Falle eines Stakers, Blöcke zu erstellen und zu validieren. Dafür eignet sich ein privater Computer oder ein Smartphone (*Staking Mit Ethereum*, o.D.). Diese müssen in den meisten Fällen nicht extra für den Staking Prozess gekauft werden.

Das Ethereum Netzwerk verbraucht unabhängig vom Konsensmechanismus weiterhin Strom. Der Stromverbrauch pro Jahr und pro Transaktion hat sich durch den Ethereum-Merge verändert. Abbildung 5 zeigt den Stromverbrauch des Ethereum Netzwerkes bis zum Ende 2022:

Abbildung 5: Stromverbrauch vom Ethereum Netzwerk



Quelle: *Ethereum Energy Consumption Index*, 2022

Wie bei Bitcoin steigt auch im Ethereum Netzwerk der Stromverbrauch nach Veröffentlichungsdatum der Kryptowährung erst gering an. Ab Anfang des Jahres 2021, während die Kurse für Bitcoin und Ethereum stark anstiegen (*Aktueller Bitcoin Kurs (BTC)*, 2022; *Aktueller Ethereum Kurs (ETH)*, 2022), steigt auch der Stromverbrauch an.

Durch den Kursanstieg gewinnen die Kryptowährungen an Netzwerkteilnehmern die Mining betreiben. Da bis September 2022 auch Ethereum noch durch Mining gewonnen werden konnte, ist der Stromverbrauch zu diesem Zeitpunkt hoch. Vor dem Merge hat das Ethereum Netzwerk 87,44 TWh im Jahr verbraucht (*Ethereum Energy Consumption Index Way Back Machine*, 2022). Nach dem Merge ist der Stromverbrauch auf 2,6 GWh gesunken (*Ethereums Energieverbrauch*, 2022). Der Stromverbrauch ist nach Umstellung des Konsensmechanismus um ca. 99% gesunken.

Auch der Stromverbrauch pro Transaktion hat sich durch den Ethereum-Merge verringert. Vor dem Ethereum-Merge hat eine Transaktion 194,27 kWh benötigt (*Ethereum Energy Consumption Index Way Back Machine*, 2022). Inzwischen liegen die Stromkosten für eine Transaktion bei 0,03 kWh (*Ethereum Energy Consumption Index*, 2022).

Stromverbrauch und CO₂e/CO₂-Ausstoß stehen in direktem Zusammenhang. Digiconomist schätzt den CO₂e/CO₂-Ausstoß vor dem Ethereum-Merge auf 48,77 MtCO₂e (*Ethereum Energy Consumption Index Way Back Machine*, 2022). Nach dem Ethereum-Merge sinkt dieser auf 869,78 tCO₂e (CCRI, 2022). Die Reduktion des Stromverbrauchs verringert das durch das Ethereum-Netzwerk ausgestoßene CO₂e/CO₂.

Um wie in dem Kapitel zuvor, die ökologischen Daten der Kryptowährung Ethereum zusammenzufassen, werden diese in Tabelle 11 eingetragen. Dabei werden die gleichen Aspekte, wie zuvor bei Bitcoin aufgeführt und Ethereum ist unter Ethereum Pre-Merge und Ethereum Post-Merge aufgeteilt:

Tabelle 11: Ergebnisse zu den ökologischen Daten von Ethereum

Bewertungskriterien	Unterteilung	Ethereum Pre-Merge	Ethereum Post-Merge
Stromverbrauch	Pro Jahr	87,44 TWh	2,6 GWh
	Pro Transaktion	194,27 kWh	0,03 kWh
Elektroschrott	Pro Jahr	k.A.	-
	Pro Transaktion	k.A.	-
CO ₂ e/CO ₂ -Ausstoß	-	48,77 MtCO ₂ e	869,78 tCO ₂ e

6.3. Ökologischer Vergleich

Neben Bitcoin und Ethereum gibt es Kryptowährungen, die ökologischer sind als diese. Im Folgenden werden die zuvor ausgewählten Kryptowährungen untereinander in den Bewertungskategorien aus Tabelle 3 verglichen (siehe Kapitel 5 für die Auswahl und deren Begründung). Dazu zählen der Stromverbrauch pro Jahr und pro Transaktion, der

CO₂e/CO₂-Ausstoß pro Jahr, der Anfall von Elektroschrott und die Transaktionen pro Sekunde. Die ersten drei Aspekte sollen die ökologische Wirkung der Kryptowährung beschreiben. Wie in Kapitel 4.1. begründet, stehen die drei Aspekte für die Wirkungskategorien: Ressourcenverbrauch fossil, Ressourcenverbrauch Metalle und Mineralien, Eutrophierung, Humantoxizität und Klimawandel. Die Transaktionen pro Sekunde haben keine ökologische Wirkung. Sie beschreiben die Leistung durch Skalierbarkeit und Geschwindigkeit einer Kryptowährung.

Tabelle 12 zeigt den Vergleich der einzelnen Aspekte. In jeder Spalte sind jeweils die schlechtesten und die besten Werte markiert. Der Bitcoin weist in allen vier Kategorien die höchsten und damit schlechtesten Werte auf. Die Kryptowährung benötigt mit 1430,2 kWh am meisten Strom pro Transaktion und mit 136,04 TWh im Jahr am meisten Strom pro Jahr. Gleiches gilt für den CO₂e/CO₂-Ausstoß. Bitcoin hat den höchsten CO₂e/CO₂-Ausstoß mit 62,57 MtCO₂e. Die Werte von Ethereum vor dem Merge sind ähnlich hoch wie beim Bitcoin. Beide Währungen haben deutlich höhere Werte als die anderen Kryptowährungen. Die besten Werte weisen die Kryptowährungen Polkadot und Polygon auf. Polkadot hat mit ca. 0,0702 GWh pro Jahr den niedrigsten Stromverbrauch und mit 33,36 tCO₂e im Jahr den niedrigsten CO₂e/CO₂-Ausstoß. Polygon liegt leicht über diesen Werten, hat mit ca. 0,0001 kWh den niedrigsten Stromverbrauch pro Transaktion und ist mit 7000 Transaktionen pro Sekunde die schnellste der verglichenen Kryptowährungen. Die anderen Kryptowährungen sind bei Stromverbrauch und CO₂e/CO₂-Ausstoß im unteren Bereich, mit der Ausnahme von Dogecoin. Dogecoin sticht beim jährlichen Stromverbrauch und dem CO₂e/CO₂-Ausstoß heraus. Die Kryptowährung hat im Gegensatz zu den anderen Kryptowährungen mit 3,4 TWh und 1,9 MtCO₂e höhere Werte. Es zeigt sich, dass Kryptowährungen, die mit dem Proof-of-Work Mechanismus funktionieren, einen höheren Stromverbrauch haben als Kryptowährungen mit alternativen Konsensmechanismen. Durch den erhöhten Stromverbrauch weisen Proof-of-Work Kryptowährungen auch erhöhte Stromkosten bei Transaktionen und erhöhte CO₂e/CO₂ Werte auf.

Tabelle 12: Ökologischer Vergleich zwischen den ausgewählten Kryptowährungen basierend auf: *11 Fastest Cryptocurrencies with Blockchains Boasting High TPS, 2022*; de Best, 2022a; *Ethereums Energieverbrauch, 2022*; *Green Currency Interactive Tool* o.D.; Adejumo 2022; Sinha 2022; Gallersdörfer et al., 2022; CCRI, 2022b

Währung	kWh pro Transaktion	Stromverbrauch pro Jahr	CO2 pro Jahr	Transaktionen pro Sekunde
Bitcoin	1430,2	136,04 TWh	62,57 Mt	7
Ethereum Pre-Merge	194,27	87,44 TWh	48,77 Mt	15
Ethereum Post-Merge	0,03	2,6 GWh	869,78 t	15
XRP	0,0079	0,474 GWh	270 t	1500
Cardano	0,05159	0,598755 GWh	284,41 t	250
Solana	0,000166	1,96793 GWh	934,77 t	5000
Dogecoin	0,12	3,4 TWh	1,9 Mt	30
Polkadot	0,01742	0,070237 GWh	33,36 t	1000
Polygon	0,000103	0,109213 GWh	50,13 t	7000

Die Ergebnisse aus Tabelle 12 lassen sich in Tabelle 13 zusammenfassen, die die jeweils unökologischste und die ökologischste Kryptowährung der Kategorie zeigt. Die Kategorie Ressourcenverbrauch Metalle und Mineralien wird hier nicht beachtet, da dieser nur bei Proof-of-Work Kryptowährungen anfällt und genaue Zahlen nur beim Bitcoin vorliegen. Gewertet werden kann also nur, ob Elektroschrott anfällt.

Tabelle 13: Zusammenfassung des Vergleichs aus Tabelle 12

Bewertungskriterien	Unterteilung	Währung mit den ökologischsten Werten	Währung mit den unökologischsten Werten
Stromverbrauch	Pro Jahr	Polkadot	Bitcoin
	Pro Transaktion	Polygon	Bitcoin
CO2e/CO2-Ausstoß	-	Polkadot	Bitcoin

Polkadot hat die ökologischsten Werte in den Kategorien Gesamtstromverbrauch und CO2e/CO2-Ausstoß. Polygon hat den geringsten Stromverbrauch pro Transaktion. Der Bitcoin hat in allen Kategorien die unökologischsten Werte.

6.4. Energiepass

Um aus dem Vergleich aus Kapitel 6.3. eine Übersicht zu schaffen, werden in diesem Kapitel Energiepässe der hier verglichenen Währungen erstellt. Diese beinhalten die ökologischen Bewertungskriterien und Leistungskriterien der Kryptowährung und geben anhand dieser Kriterien eine Gesamteinordnungs- und –bewertung der untersuchten

Kryptowährungen ab. Folgende Bewertungstabelle wurde aus den vorliegenden Daten der Kryptowährungen abgeleitet:

Tabelle 14: Bewertungssystem für den Energiepass

Bewertungskriterien	A	B	C
kWh pro Transaktion	< 0,01 kWh	0,01 - 1,0 kWh	> 1,0 kWh
Stromverbrauch pro Jahr	< 1 GWh	1 - 10 GWh	> 10 GWh
CO2 pro Jahr	< 100 kg	100 – 500 kg	> 500 kg
Mining	+		-
Transaktionen pro Sekunde	> 1000	100 - 1000	< 100

Dabei wurde sich an jeweiligen Daten der Kryptowährungen orientiert, um jeweils einen Bereich für die verschiedenen Bewertungen zu erstellen und die Kryptowährungen untereinander zu vergleichen. Die Bewertungsbereiche zielen darauf ab, vor allem die mittleren bis kleinen Daten der Währungen zu unterscheiden, da von diesen mehr vorliegen. Hohe Daten, wie die von Bitcoin oder Ethereum Pre-Merge, sind Ausnahmen und wurden aus diesem Grund bei der Erstellung der Bewertungstabelle nicht berücksichtigt. Es musste eine Obergrenze für die C-Bewertung festgelegt werden, weshalb die hohen Differenzen bei gleichen Bewertungen von bspw. Ethereum Post-Merge und Bitcoin, nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 15: Bitcoin Energiepass






Bewertungskriterien	Bitcoin
kWh pro Transaktion	
Stromverbrauch pro Jahr	
CO2 pro Jahr	
Mining	+
Transaktionen pro Sekunde	
Gesamtbewertung	

Tabelle 16: Ethereum Pre-Merge Energiepass

Bewertungskriterien	Ethereum Pre-Merge
kWh pro Transaktion	C
Stromverbrauch pro Jahr	C
CO2 pro Jahr	C
Mining	+
Transaktionen pro Sekunde	C
Gesamtbewertung	C

Tabelle 17: Ethereum Post-Merge Energiepass

Bewertungskriterien	Ethereum Post-Merge
kWh pro Transaktion	B
Stromverbrauch pro Jahr	B
CO2 pro Jahr	C
Mining	-
Transaktionen pro Sekunde	C
Gesamtbewertung	B

Tabelle 18: XRP Energiepass






Bewertungskriterien	XRP
kWh pro Transaktion	A 
Stromverbrauch pro Jahr	A 
CO2 pro Jahr	B 
Mining	-
Transaktionen pro Sekunde	A 
Gesamtbewertung	A 

Tabelle 19: Cardano Energiepass






Bewertungskriterien	Cardano
kWh pro Transaktion	B 
Stromverbrauch pro Jahr	A 
CO2 pro Jahr	B 
Mining	-
Transaktionen pro Sekunde	B 
Gesamtbewertung	B 

Tabelle 20: Solana Energiepass






Bewertungskriterien	Solana
kWh pro Transaktion	
Stromverbrauch pro Jahr	
CO2 pro Jahr	
Mining	-
Transaktionen pro Sekunde	
Gesamtbewertung	

Tabelle 21: Dogecoin Energiepass






Bewertungskriterien	Dogecoin
kWh pro Transaktion	
Stromverbrauch pro Jahr	
CO2 pro Jahr	
Mining	+
Transaktionen pro Sekunde	
Gesamtbewertung	

Tabelle 22: Polkadot Energiepass

Bewertungskriterien	Polkadot
kWh pro Transaktion	B
Stromverbrauch pro Jahr	A
CO2 pro Jahr	A
Mining	-
Transaktionen pro Sekunde	B
Gesamtbewertung	A

Tabelle 23: Polygon Energiepass

Bewertungskriterien	Polygon
kWh pro Transaktion	A
Stromverbrauch pro Jahr	A
CO2 pro Jahr	A
Mining	-
Transaktionen pro Sekunde	A
Gesamtbewertung	A

Den ökologischsten Energiepass hat Polygon. Diese Kryptowährung hat sowohl eine hohe Geschwindigkeit als auch niedrige Stromkosten und CO2e/CO2-Ausstoß. Auch XRP und Polkadot werden überwiegend positiv bewertet. Am schlechtesten schneiden Bitcoin und Ethereum Pre-Merge ab. Beide Kryptowährungen haben durchgehend eine Bewertung von C. Dogecoin und Ethereum Post-Merge liegen ohne eine A Bewertung ebenfalls im unteren Bereich. Besser als diese wurden Solana und Cardano bewertet. In den folgenden Kapiteln wird aus den Energiepässen ein Ranking erstellt und ein Vergleich zum Bargeld gezogen.

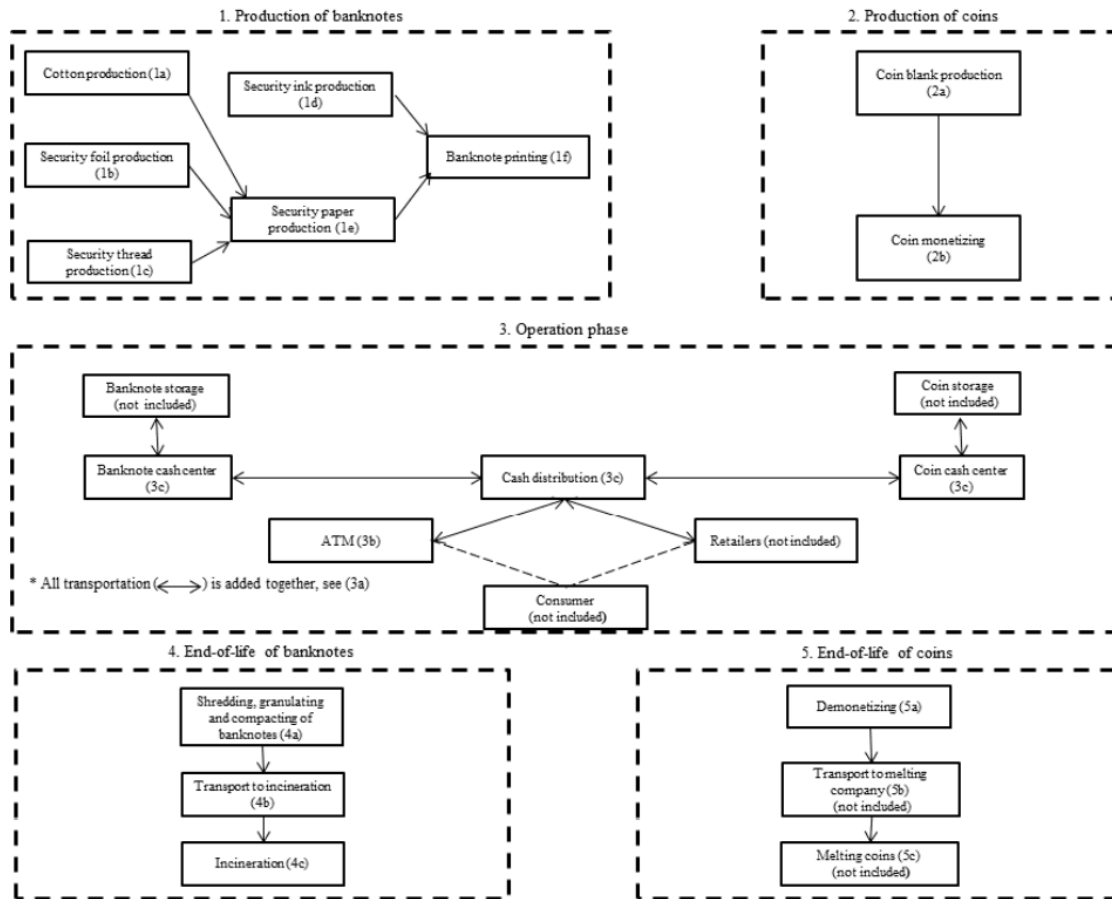
7. Gegenüberstellung von Kryptowährung und herkömmlichem Geld

Aus den vorherigen Kapiteln zeigt sich, dass ökologischere Kryptowährungen als der Bitcoin existieren. Und diese zum Teil ökologische Ansätze verfolgen. Die untersuchten Kryptowährungen unterschieden sich in den ökologischen Aspekten stark voneinander. Ob die Kryptowährungen verglichen mit herkömmlichem Geld ökologischer sind, soll im folgenden Kapitel untersucht werden. Herkömmliches Geld besteht aus verschiedenen Zahlungsarten: Bargeld, Checks, Kreditkarten, Buchgeld oder mobile Zahlungen, beispielsweise per Smartphone. Nicht alle Zahlungsarten können für den Vergleich untersucht werden, da die Datenlagen dafür zu gering sind. Daher wird sich auf das Bargeld beschränkt, da dieses in Deutschland gemessen an der Transaktionsanzahl immer noch das am häufigsten verwendete Zahlungsmittel für alltägliche Zahlungen ist (Deutsche Bundesbank, 2022). Wie das Bargeld mit Kryptowährung verglichen wird und ob Kryptowährungen ökologischer als Bargeld sind, sollen die folgenden Kapitel zeigen. Die Untersuchung des Bargeldes beschränkt sich auf den Euro. Dazu werden Daten einer Life Circle Analyse der niederländischen Zentralbank verglichen. In dieser Analyse wird der Lebenszyklus des niederländischen Bargeldsystems eines Jahres und dessen ökologische Auswirkung beschrieben. Es wird sich auf diese Analyse gestützt, da es keine deutsche Analyse zum Produktions- und Verwaltungsprozess des Euros gibt.

7.1. Bargeld

Zunächst werden die einzelnen Schritte von der Produktion bis zur Entsorgung des Bargeldes beschrieben. Aus diesen werden im nächsten Kapitel die zum Vergleich mit Kryptowährung benötigten Daten gesammelt. Abbildung 6 zeigt die Schritte der Produktion bis zur Entsorgung und ihre Unterteilungen. Der Bargeldzyklus lässt sich in drei Stufen unterteilen: Die Produktion, der Umlauf und die Entsorgung.

Abbildung 6: Übersicht über die einzelnen Prozesse des Bargeldzyklus



Quelle: Hanegraaf et al., 2018

Wie Kryptowährung muss auch der Euro produziert werden. Der Unterschied ist, dass nach der Produktion der jeweiligen Währung, beispielsweise der Bitcoin digital vorliegt, das Bargeld im Gegensatz dazu physisch produziert wurde. Für den Euro lässt sich der Produktionsschritt in zwei Produktionsarten unterteilen: Die Produktion von Banknoten und die Produktion von Münzgeld (siehe Abbildung 6). Bei der Herstellung von Banknoten müssen mehr Schritte durchlaufen werden als beim Münzgeld (siehe Abbildung 6). Als Material werden Baumwolle, eine spezielle Folie, Sicherheitsfäden und Druckertinte verwendet (siehe Abbildung 6). Das Papier wird zunächst in Bogenform hergestellt und anschließend bedruckt (siehe Abbildung 6). Dabei wird die Baumwolle zu Beginn des Herstellungsprozesses mit Natronlauge und Wasserstoffperoxid gebleicht (Europäische Zentralbank, o.D.). Nach der Aufbereitung der Baumwolle, wird diese zu 500 Blatt gestapelt und für jeweils 24 bis 60 Banknoten zugeschnitten (Europäische Zentralbank, o.D.). Anschließend werden die Banknoten als Sicherheitsmaßnahme mit zwei Wasserzeichen und Sicherheitsfäden versehen (Europäische Zentralbank, o.D.). Es folgt die Bedruckung der Banknoten sowie das Aufdrucken der Folie und Glanzstreifen (Europäische Zentralbank, o.D.). Der Druckprozess besteht aus vier verschiedenen Drucktechniken und spezieller Druckerfarbe (Europäische Zentralbank,

o.D.). Die Münzproduktion gestaltet sich einfacher (siehe Abbildung 6). Zunächst werden die Münzen produziert und anschließend geprägt. Sie setzen sich aus Stahl, Kupfer, Aluminium, Zink, Zinn und Nickel zusammen (Hanegraaf et al., 2018).

Nach der Produktion kommt das Bargeld in Umlauf. Dazu werden Banknoten und Münzen gelagert, transportiert und an Banken, Automaten und Geschäfte verteilt (siehe Abbildung 6). Der Umlauf des Bargeldes funktioniert ähnlich wie ein Kreislauf.

Die letzte Stufe ist die Entsorgung des Bargeldes. Wie bei der Produktion wird in dieser Stufe zwischen Banknoten und Münzgeld unterschieden. Zunächst wird das Geld zur Entsorgungsstellen transportiert (siehe Abbildung 6). Die Banknoten werden geschreddert, kompakt gepresst und anschließend zur Verbrennung transportiert (siehe Abbildung 6). Das Münzgeld wird zerlegt und zum Einschmelzen der Metalle transportiert (siehe Abbildung 6).

Tabelle 24 zeigt die benötigten Material- und Stromkosten von der Produktion, Verwaltung und Entsorgung des Bargeldes. Am meisten Material wird während der Herstellung benötigt. Baumwolle und Papier sind Hauptbestandteil der gesamten Materialkosten (siehe Tabelle 24). Der Stromverbrauch ist während der Verwaltung am höchsten. Der Transport und der Betrieb der Geldautomaten verbraucht den Großteil (siehe Tabelle 24) an Strom.

Tabelle 24: Material- und Stromkosten der Bargeldproduktion basierend auf Hanegraaf et al., 2018

Schritt	Materialverbrauch	Stromverbrauch
Baumwollproduktion	157.125 Kg	2,4 MWh
Folienproduktion	7.600 Kg	1,4 MWh
Fadenproduktion	1.593 Kg	0,267 MWh
Papierherstellung	267.144 Kg	7,8 MWh
Tinte	9.900 Kg	-
Banknotendruck	22.192 Kg	232 MWh
Münzherstellung	25.600 Kg	-
Münzprägung	-	71,6 MWh
Transport	-	10.100 MWh
Geldautomaten	-	10.100 MWh
Verwaltung	750 Kg	752 MWh
Zerstörung des Geldes		158,5 MWh
Transport	-	-
Verbrennung und Einschmelzung	-	-
Gesamt	491,904 t	0,021425967 TWh

7.2. Wie ökologisch ist die Bargeldproduktion?

Die einzelnen Stufen des Bargeldzyklus sind im vorherigen Kapitel erklärt worden. Um jetzt einen Vergleich zu den Kryptowährungen ziehen zu können, muss geklärt werden, welche Schritte der Bargeldproduktion aus ökologischer Sicht problematisch sind und ob diese, wie Kryptowährungen in die gleichen Wirkungskategorien aus Tabelle 2 einzuordnen sind.

Die Life Circle Analyse von Hanegraaf et al. listet bereits einige ökologische Aspekte auf, die sich mit den bei der Kryptowährung untersuchten ökologischen Aspekten überschneiden. Dazu gehören Materialverbrauch und Stromverbrauch, ebenso wie CO₂e/CO₂-Ausstoß.

Der Stromverbrauch bei Bargeld ist nicht für die Funktion des Geldes relevant, so wie es bei den Netzwerken von Kryptowährungen der Fall ist, sondern nur für den Produktions- und Verwaltungsprozess (Hanegraaf et al., 2018). Es ist möglich mit Bargeld ohne Stromversorgung zu bezahlen. Es wird keine Rechenleistung benötigt, um Transaktionen zu bestätigen. Zwar werden Kassen, Geldautomaten oder ähnliches genutzt, theoretisch sind sie aber nicht notwendig. Kryptowährungen hingegen funktionieren nicht ohne Rechenleistung oder Stromversorgung. Bargeld benötigt vor Allem während der Produktion Strom. Gemeint sind hier die Bearbeitung der Baumwolle, Herstellung der Folie und Druckertinte, die Prägung und Produktion des Münzgeldes und die Verpackung (Hanegraaf et al., 2018). Damit ist der erste vergleichbare ökologische Aspekt der Stromverbrauch bei Bargeld und Kryptowährung.

Neben dem Stromverbrauch entstehen Materialkosten. Diese fallen bei Kryptowährungen mit Proof-of-Work als Konsensmechanismus in Form von Herstellungsprozessen der Mining Hardware und dem dadurch entstehenden Elektroschrott an. Für den Bargeldzyklus ist nach Hanegraafs Life Circle Analyse keine direkte Hardware notwendig, wodurch auch kein Elektroschrott anfällt, jedoch werden andere Materialien für die Bargeldproduktion verbraucht. Hauptprodukt bei der Bargeldproduktion von Banknoten ist Baumwolle. Ob der Anbau und die Nutzung dieser Baumwolle ökologisch genauso problematisch oder vielleicht noch problematischer sind, wie anfallender Elektroschrott, lässt sich nicht sagen. Aber auch die für Bargeld genutzte Baumwolle ist ökologisch problematisch. Laut Hanegraaf et al. besteht die genutzte Baumwolle zu 60% aus herkömmlicher Baumwolle, zu 35% aus organischer Baumwolle und zu 5% aus Fair Trade Baumwolle (Hanegraaf et al., 2018). Der Anbau von Baumwolle benötigt viel Wasser. Laut WWF sind beispielsweise für ein Kilogramm Baumwolle 11.000 Liter Wasser notwendig (*Wasserverschwender Landwirtschaft*, 2020). Für den Herstellungsprozess der Banknoten, den Hanegraaf et al. in der Life Circle Analyse darstellt, werden 157.000 Kilogramm Baumwolle benötigt. Zu hohe

Wasserentnahmen aus Gewässern können problematisch sein und zu erhöhten Salzgehalten führen (*Wasserverschwender Landwirtschaft*, 2020). Ebenfalls problematisch ist der geringere Anteil an organischer Baumwolle. Diese wird nicht mit Pestiziden oder Chemikalien gedüngt und nur mit Regenwasser bewässert (Hanegraaf et al., 2018). Herkömmliche Baumwolle hat einen höheren Anteil. Diese wird folglich mit Chemikalien und Pestiziden gedüngt, welche laut WWF zur Grundwasserverschmutzung führen. Diese resultiert in gesundheitlichen Schäden der Anwohner (*Wasserverschwender Landwirtschaft*, 2020). Auch der Herstellungsprozess des Münzgeldes weist eine negative ökologische Wirkung auf. Wie bereits erwähnt sind in dem Münzgeld folgende Metalle enthalten: Stahl, Kupfer, Aluminium, Zink, Zinn und Nickel. Wovon Stahl, Aluminium, Kupfer und Nickel zu den metallischen Rohstoffen zählen, welche nicht erneuerbar sind. Auch die Folie, welche zur Banknotenproduktion hergestellt wird, enthält Aluminium. Der Abbau dieser Metalle und die Verarbeitung fallen, genau wie die Produktion und Entsorgung der Mining Hardware für Kryptowährung, in die Wirkungskategorie Ressourcennutzung von Metallen und Mineralien. Der Abbau dieser Metalle ist wie bereits in Kapitel 4.2. erwähnt ökologisch schädlich, da Luft, Boden und Gewässer verschmutzt werden (*Mining: Die Folgen des weltweiten Rohstoffabbaus*, 2019). In beiden Fällen, Kryptowährung mit Proof-of-Work und Bargeld, ist der Herstellungsprozess ökologisch problematisch. Beide Herstellungsprozesse wirken sich negativ auf die Umwelt aus und betreffen dabei gleiche Wirkungskategorien.

Eine weitere Wirkungskategorie, die auch die Kryptowährung betrifft, ist der Klimawandel durch den CO₂e/CO₂-Ausstoß. Die Materialien und das produzierte Bargeld müssen transportiert werden. Nicht nur durch diesen Transport, sondern auch durch den bereits erwähnten Stromverbrauch entsteht CO₂e/CO₂.

Die folgende Tabelle 25 zeigt die betroffenen Wirkungskategorien der Bargeldproduktion und ihre Ursache. Diese überschneiden sich mit den von der Kryptowährung betroffenen Wirkungskategorien in Tabelle 2.

Tabelle 25: Wirkungskategorien der PEF-Methode basierend auf: Finkbeiner, Bach & Lehmann, 2018

Wirkungskategorie	Ursache
Klimawandel, gesamt	CO2e/CO2-Ausstoß durch Strom und Transport
Klimawandel, biogen	-
Klimawandel, Landnutzung und Transformation	-
Stratosphärischer Ozonabbau	-
Humantoxizität, krebserregend und nicht-krebserregend	Abbau von Metallen für Münzen
Feinstaub	-
Ionisierende Strahlung	-
Bildung von fotochemischem Ozon	-
Versauerung, terrestrisch	-
Eutrophierung, terrestrisch	Abbau von Metallen für Münzen
Eutrophierung, Frischwasser	Abbau von Metallen für Münzen
Eutrophierung, marin	Abbau von Metallen für Münzen
Landnutzung	Anbau von Baumwolle
Wasserverbrauch	Bewässerung der Baumwolle
Ressourcennutzung, Mineralien und Metalle	Münzherstellung
Ressourcennutzung, fossil	Nutzung von Stromquellen

7.3. Vergleich zu Kryptowährungen

Um nun die ökologischen Aspekte des Bargeldes zu untersuchen und mit denen der Kryptowährung zu vergleichen muss festgelegt werden, was die Bewertungskategorien sind. Da Bargeld und Kryptowährungen gleiche Wirkungskategorien haben (siehe Tabelle 2 und Tabelle 25), lassen sie sich in diesen vergleichen. Bewertungskategorien zu denen keine Daten vorliegen oder sich nicht überschneiden, werden im Folgenden nicht verglichen. Aus den Wirkungskategorien lassen sich die in Tabelle 26 gezeigten vergleichbaren Bewertungskategorien zusammenfassen und wie folgt vergleichen:

Tabelle 26: Vergleich von Kryptowährungen und Bargeld

Währung	CO2e/ CO2 gesamt	Stromverbrauch im Jahr	Elektroschrott/ Materialverbrauch
Bargeld	17.000 t	21,425967 GWh	491,904 t
Bitcoin	62,57 Mt	136,04 TWh	30.000 - 42.000 t
Ethereum	869,78 t	2,6 GWh	-
Polygon	50,13 t	0,109213 GWh	-

Für den Vergleich wurden die beiden größten Kryptowährungen Bitcoin und Ethereum ausgewählt und die Währung, welche laut Bewertung nach dem Energiepass aus Kapitel

6.4 am ökologischsten ist. Die schlechtesten Werte sind jeweils rot, die besten Werte grün markiert. Die verschiedenen Währungen werden zunächst in CO₂e/CO₂-Ausstoß verglichen, da sie alle durch verschiedene Ursachen einen messbaren CO₂e/CO₂-Wert ausstoßen. Bei Kryptowährungen entsteht dieser durch verschiedene nicht erneuerbare Stromquellen. Bei Bargeld wird CO₂e/CO₂ durch Transport und Stromverbrauch in verschiedenen Produktionsschritten ausgestoßen. Bitcoin schneidet hier, wie auch bei dem Vergleich der Kryptowährungen untereinander (siehe Tabelle 12) am schlechtesten ab. Mit 62,57 MtCO₂e/CO₂ hat die Währungen den höchsten Wert. Der CO₂e/CO₂-Wert des Bargeldes ist mit 17.000 tCO₂e/CO₂ geringer als Bitcoin, Dogecoin und Ethereum Pre-Merge. Eine weitere vergleichbare Kategorie ist der Stromverbrauch. Kryptowährungen benötigen als digitale Währung Strom um zu funktionieren. Die Kommunikation im Netzwerk und die Transaktionen haben den höchsten Stromverbrauch. Bargeld benötigt in einzelnen Produktions- und Entsorgungsschritten Strom, ebenso wie in der Verwaltung. Diese funktioniert unter anderem durch Geldautomaten. Der Stromverbrauch des Bargeldes ist im Gegensatz zu Bitcoin gering. Verglichen mit Ethereum Post-Merge und Polygon jedoch hoch (siehe Tabelle 26). Der letzte Aspekt, der verglichen wird, ist der Materialverbrauch. Während durch Währungen wie Bitcoin Elektroschrott anfällt, werden für die Bargeldproduktion verschiedene Materialien verarbeitet, um das Geld herzustellen. Laut Hanegraaf et al. liegt die Materialmenge bei 491,904 t (Hanegraaf et al., 2018). Hierzu zählen Materialien für Banknoten- und Münzgeldherstellung. Die ökologische Problematik liegt, ähnlich wie bei Elektroschrott, in dem Abbau der Metalle (siehe Kapitel 7.2). Trotz der höheren Materialvielfalt sind die Materialkosten des Bargeldes geringer als bei Bitcoin. Der ökologische Vorteil liegt hier aber bei Kryptowährungen, die kein Mining benötigen. Bei diesen fallen weder Materialkosten noch Elektroschrott an.

Wird Bargeld unter gleichen Aspekten wie die Kryptowährung in den Energiepässen bewertet, werden ähnliche Ergebnisse wie bei Bitcoin und Ethereum erzielt. Diese ist in Tabelle 27 dargestellt. Kategorien, die sich nicht vergleichen oder erfassen lassen, wie z.B. Transaktionen pro Sekunde und kWh pro Transaktion wurden hierbei nicht bewertet.

Tabelle 27: Bargeld Energiepass

Bewertungskriterien	Bargeld
kWh pro Transaktion	-
Stromverbrauch pro Jahr	C
CO2 pro Jahr	C
Mining	-
Transaktionen pro Sekunde	-
Gesamtbewertung	C

Abschließend kann ein Ranking basierend auf den Ergebnissen des vorherigen Vergleichs und den Energiepässen aufgestellt werden. Bei gleichen Bewertungen der Währungen wurden die genauen Zahlen zu den jeweiligen Aspekten verglichen. Hierbei wird die Leistung nicht miteinbezogen. Es wurden nur die ökologischen Aspekte berücksichtigt.

Tabelle 28: Ranking aller untersuchten Währungen nach ökologischer Tragbarkeit

Platz	Währung
1	Polygon
2	Polkadot
3	XRP
4	Cardano
5	Solana
6	Ethereum Post-Merge
7	Bargeld
8	Dogecoin
9	EthereumPre-Merge
10	Bitcoin

Die Ergebnisse zeigen, dass Bargeld ökologischer ist als die untersuchten Proof-of-Work Kryptowährungen. Die Kryptowährungen, die mit Proof-of-Stake funktionieren, sind ökologischer als Bargeld. Gleiches zeigt die Bewertung von Bargeld nach Energiepass aus Kapitel 6.4. Es gibt also bereits ökologische Alternativen zu Bargeld.

8. Lösungen und ökologische Zukunftskonzepte

Ökologisch problematisch sind vor allem die Kryptowährungen, deren Blockchain mit Proof-of-Work arbeitet. Im Folgenden sollen Lösungsvorschläge und Konzepte vorgestellt werden, die zum Teil bereits umgesetzt sind und Kryptowährungen ökologischer machen.

Eins der Hauptprobleme bei Kryptowährungen ist der Stromverbrauch. Unabhängig vom Konsensmechanismus wird immer Strom verbraucht. Dieser kann unterschiedlich hoch sein. Deutlich höher ist der Verbrauch bei Kryptowährungen, die durch Mining gewonnen werden und den Konsensmechanismus Proof-of-Work nutzen. Um den Stromverbrauch zu senken gibt es verschiedene Lösungsansätze. Einer dieser Ansätze ist ein Wechsel des Konsensmechanismus. Diesen Lösungsansatz hat Ethereum bereits umgesetzt und stieg im September 2022 auf den Konsensmechanismus Proof-of-Stake um. Dadurch konnte die Kryptowährung den Stromverbrauch im Netzwerk um mehr als 99% senken (*Ethereum Energy Consumption Index, 2022*). Ein weiteres Problem ist das Anfallen von Elektroschrott durch Mining. Dieses würde ebenfalls durch einen Umstieg auf Proof-of-Stake gelöst werden. Eine alternative Lösung beider Probleme wäre ein Verbot von Mining. Dieses wurde bereits von China 2021 ausgesprochen, erwies sich jedoch nicht als langfristige Lösung. Mining wurde ca. 2 Monate nach Aussprache des Verbotes erneut betrieben und verlagerte sich in andere Länder (*Bitcoin Mining Map, 2022*). Dieser Ansatz bietet somit keine langfristige Lösung.

Auch überschüssige Wärme wird durch Mining produziert. Serverfarmen laufen 24 Stunden und produzieren Hitze, die nicht weiter genutzt wird. Es gibt bereits einige Ansätze, die beim Mining produzierte Wärme anderweitig zu nutzen, beispielsweise zur urbanen Landwirtschaft. Hierbei werden Lebensmittel auf Dächern oder freien Flächen in Städten angebaut. Das Konzept einer Kombination von urbaner Landwirtschaft und Serverfarmen sieht so aus, dass ungenutzte Industriegebäude zu Serverfarmen umgebaut werden können und deren freie Flächen zum Anbau von Pflanzen in Gewächshäusern und Gewinnung von Solarenergie genutzt werden (Šebesta, 2018). Überschüssige Wärme der Miningfarm könnte zum Betreiben von Gewächshäusern genutzt werden. Das Ergebnis wäre ein Unternehmen, welches erneuerbare Energien zum minen von Bitcoin nutzt und gleichzeitig urbane Landwirtschaft betreibt. Dieses Konzept spricht vor allem Unternehmen an, die einen Fokus auf Solarenergie haben (Šebesta, 2018). Allerdings bietet dieses Lösungskonzept keine komplett ökologische Alternative. Das Problem des Elektroschrotts besteht weiterhin. Die Idee ist schwer umsetzbar, da Flächen gekauft und verwaltet werden müssen und dadurch der Gewinn sinkt. Die durch das Mining entstehende Wärme könnte auch anders genutzt werden. Beispielsweise können statt Gewächshäusern Wohnkomplexe oder Büros geheizt

werden, um so Stromkosten zu sparen. Ein ähnliches Konzept wurde bereits umgesetzt. Dabei heizte Mining Hardware in der Garage einer Privatperson im Winter Teile des Hauses, wodurch die Hälfte der üblichen Stromkosten eingespart werden konnten (Brühl, 2021). Auch hier tritt dasselbe Problem wie zuvor auf. Die Nutzung der Wärme verringert weder den Stromverbrauch der Mining Geräte noch das Anfallen von Elektroschrott.

Neben den Lösungsansätzen zu Proof-of-Work Kryptowährungen, gibt es auch Möglichkeiten, die ökologische Konzepte für Altcoins bieten. Es existieren Altcoins, die einen Fokus auf Ökologie legen und ihre Funktionsweise entsprechend angepasst haben. Einer dieser ökologischen Altcoins ist Forestcoin. Forestcoins lassen sich durch das Pflanzen von Bäumen verdienen (*Forestcoin Cryptocurrency*, o.D.). Das Pflanzen wird durch Fotos und eine Bestätigung durch die Community verifiziert (*Forestcoin Cryptocurrency*, o.D.). Ein weiterer ökologischer Altcoin ist Solarcoin. Das Konzept ähnelt dem von Forestcoin. Coins können durch Stromerzeugung mittels Solarenergie gewonnen werden (*SolarCoin*, o.D.). Dabei wird pro MWh, die durch Solarenergie erzeugt wird, ein Solarcoin generiert (*SolarCoin*, o.D.). Die Konzepte sind teilweise unausgereift, da der Fokus mehr auf der ökologischen Wirkung als auf der Funktion als anonymes Zahlungsmittel liegt und die Kryptowährungen sich somit nicht als Zahlungsmittel eignen. Neben direkten ökologischen Konzepten sind auch Partnerschaften mit Unternehmen möglich. Diese überwachen die ökologischen Daten einer Kryptowährung, wie z.B. den CO₂e/CO₂-Ausstoß und arbeiten an Verbesserungen der ökologischen Werte. Algorand hat beispielsweise eine Partnerschaft mit dem Unternehmen Climatetrade, welche das beschriebene Konzept umsetzt (*Climatetrade*, o.D.).

Zusammenfassend lässt sich sagen, um eine Kryptowährung ökologischer zu gestalten, sollten Strom- und Transaktionskosten gesenkt werden, der CO₂e/CO₂-Ausstoß so gering wie möglich gehalten und Mining abgeschafft werden. Die realistischste Lösung für Proof-of-Work Kryptowährungen ist ein Umstieg auf Proof-of-Stake. Nutzt eine Kryptowährung bereits Proof-of-Stake oder einen alternativen Konsensmechanismus, können Kooperationen mit Unternehmen wie Climatetrade gemacht werden. Zudem können kleinere Altcoins mit vielversprechenden Lösungsansätzen wie z.B. Solarcoin gefördert und auf andere Kryptowährungen übertragen und weiterentwickelt werden.

9. Fazit: Ist Kryptowährung als Alternative zu herkömmlichem Geld ökologisch tragbar?

Abschließend kann gesagt werden, dass Kryptowährungen wie auch Bargeld einen ökologischen Einfluss haben. Wie stark dieser ist, hängt bei den Kryptowährungen vom Konsensmechanismus ab. Dieser bestimmt wie die Blockchain neue Blöcke erstellt, validiert und Einigung über den aktuellen Status im Netzwerk erlangen kann (Metzger, o.D.). Durch den Konsensmechanismus Proof-of-Work den Bitcoin und Dogecoin nutzen, werden neue Coins durch Mining generiert. Durch Mining hat das Netzwerk der Kryptowährung einen hohen Stromverbrauch, sowie einen hohen Anteil an Elektroschrott. Eine Alternative ist Proof-of-Stake. Dabei ist der Stromverbrauch geringer, wodurch kein zusätzlicher Elektroschrott anfällt. Ökologische Hauptproblematik aller Kryptowährungen, die aus der Funktionsweise und der untersuchten Literatur hervorgeht, ist Stromverbrauch und CO₂e/CO₂-Ausstoß. Bei einem ökologischen Vergleich zwischen den Kryptowährungen untereinander, wurde Stromverbrauch pro Jahr, pro Transaktion und CO₂e/CO₂-Ausstoß untersucht. Hier hat der Bitcoin, im Vergleich zu Polkadot, die deutlich höheren Werte. Gleiches gilt für die Bewertung in Form der Energiepässe. Bargeld ließ sich ebenfalls in dieses Bewertungssystem einordnen. Dabei stellte sich heraus, dass das untersuchte Bargeld ökologischer als die Kryptowährungen Bitcoin, Dogecoin und Ethereum vor dem Merge ist. Es gibt aber einige Kryptowährungen wie Ethereum, XRP, Cardano, Solana, Polkadot und Polygon, die ökologischer als Bargeld sind.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass einige Kryptowährungen bereits Potenzial haben, Bargeld aus ökologischer Sicht abzulösen, da diese teilweise weniger Stromverbrauch und CO₂e/CO₂-Ausstoß haben. Betrachtet wurde nur das Bargeldsystem in den Niederlanden, durch eine Bewertung der niederländischen Zentralbank. Es fallen weder Buchgeld noch Bezahlungen mit Karten oder andere Zahlungssysteme außer Bargeld in den Vergleich. Somit bleibt die Frage, ob Kryptowährungen herkömmliches Geld ablösen können, durch mangelnde Datenlage unbeantwortet. Es lässt sich sagen, dass Bargeld nicht mehr ökologisch tragbar ist, und Kryptowährungen dieses ersetzen könnten. Die Bargeldproduktion kann problematischer gesehen werden als hier dargestellt, da weltweit verschiedene Währungen produziert und gedruckt werden und hier nur ein kleiner Teil betrachtet worden ist. Ebenfalls bestehen für Kryptowährungen Lösungswege und Zukunftskonzepte, um den ökologischen Faktor zu verbessern und zu unterstützen. Wie die zukünftige Entwicklung von Kryptowährungen aussieht, lässt sich nicht sagen, da das weitere Bestehen und die Akzeptanz nicht nur von ökologischen, sondern auch von wirtschaftlichen und sozialen Faktoren abhängt.

Das entwickelte Bewertungssystem lässt sich auch für andere Vergleiche zwischen Währungen nutzen. Mit vorhandenen Daten zur Kartenzahlung von z.B. Visa oder Mastercard wäre es möglich diese mit Kryptowährungen zu vergleichen. Die Bewertungskategorien könnten in diesem Fall übernommen werden. Durch weitere Bewertungen mit vorhandenen Daten können genauere Aussagen über die Frage getroffen werden, welche herkömmlichen Währungen von Kryptowährungen abgelöst werden könnten.

Literaturverzeichnis

11 Fastest Cryptocurrency with Blockchain Boasting High TPS (2022), Verfügbar unter <<https://learn.bybit.com/blockchain/fastest-cryptocurrencies-high-tps/>> [abgerufen am 19. Dezember 2022]

Adejumo, O. (2022) *Polkadot looks to 10x transaction speed in new updates*, Verfügbar unter <<https://cryptoslate.com/polkadot-looks-to-10x-transaction-speed-in-new-updates/>> [abgerufen am 19. Dezember 2022]

Aktueller Bitcoin Kurs (BTC) (2022), Verfügbar unter <<https://bisonapp.com/kurswerte/bitcoin/>> [abgerufen am 01. Dezember 2022]

Aktueller Ethereum Kurs (ETH) (2022), Verfügbar unter <<https://bisonapp.com/kurswerte/ethereum/>> [abgerufen am 01. Dezember 2022]

Alonso, S. L. N. et al. (2021) *Cryptocurrency Mining from an Economic and Environmental Perspective. Analysis of the Most and Least Sustainable Countries*, Verfügbar unter <<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/14/4254>> [abgerufen am 23. September 2022]

Alt, R. (2021) *Blockchain und Distributed-Ledger-Technologien: Infrastrukturen für die überbetriebliche Vernetzung*, Verfügbar unter <https://www.researchgate.net/profile/Rainer-Alt/publication/351658154_Blockchain_und_Distributed-Ledger-Technologien_Infrastrukturen_fur_die_uberbetriebliche_Vernetzung/links/60a36a92458515952dd35805/Blockchain-und-Distributed-Ledger-Technologien-Infrastrukturen-fuer-die-ueberbetriebliche-Vernetzung.pdf> [abgerufen am 28. November 2022]

Ashmore, D. (2022), *Ethereum Merge – wann, warum und was?*, Verfügbar unter <<https://invezz.com/de/news/2022/03/29/ethereum-merge-wann-warum-und-was/>> [abgerufen am 26. Oktober 2022]

Avasthi, A. A., und A. Saxena (2018) *Two Hop Blockchain Model: Resonating between Proof of Work (PoW) and Proof of Authority (PoA)*, Verfügbar unter <https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3363575> [abgerufen am 27. Oktober 2022]

Bendel, O. (o.D.) *Kryptowährung*, Verfügbar unter <<https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/kryptowaehrung-54160>> [abgerufen am 13. Oktober 2022]

Bitcoin (o.D.), Verfügbar unter <<https://coinmarketcap.com/currencies/bitcoin/>> [abgerufen am 12. November 2022]

Bitcoin Electronic Waste Monitor (2022), Verfügbar unter <<https://digiconomist.net/bitcoin-electronic-waste-monitor/>> [abgerufen am 16. Dezember 2022]

Bitcoin Energy Consumption Index (2022), Verfügbar unter <<https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption/>> [abgerufen am 11. November 2022]

Bitcoin greenhouse gas emissions (2022), Verfügbar unter <<https://ccaf.io/cbeci/ghg/index>> [abgerufen am 16. Dezember 2022]

Bitcoin Mining Map (2022), Verfügbar unter <https://ccaf.io/cbeci/mining_map> [abgerufen am 13. Dezember 2022]

Bitcoin network power demand (2022), Verfügbar unter <<https://ccaf.io/cbeci/index>> [abgerufen am 16. Dezember 2022]

Bitcoin Statistik (o.D.), Verfügbar unter <<https://www.cryptolist.de/statistik>> [abgerufen am 12. November 2022]

Was sind Mining-Pools und wie funktionieren sie? (o.D.), Verfügbar unter <<https://www.bitpanda.com/academy/de/lektionen/wofur-gibt-es-mining-pools-und-wie-funktionieren-sie/>> [abgerufen am 27. Oktober 2022]

Block Size (o.D.), Verfügbar unter <<https://btc.com/stats/block-size>> [abgerufen am 13. Dezember 2022]

BNB (o.D.), Verfügbar unter <<https://coinmarketcap.com/currencies/bnb/>> [abgerufen am 21. November 2022]

Bode, B. (2022) *Umweltschutz: New York verhängt zweijähriges Krypto-Mining-Verbot*, Verfügbar unter <<https://www.basicthinking.de/blog/2022/11/24/new-york-krypto-mining-verbot/>> [abgerufen am 13. November 2022]

Breithut, J. (2021) *Bitcoin: Pro Transaktion entsteht ein halbes Pfund Elektroschrott*, Verfügbar unter <<https://www.spiegel.de/netzwelt/bitcoin-pro-transaktion-entsteht-ein-halbes-pfund-elektroschrott-a-6906801b-9a27-4a78-9585-91a8e7231393>> [abgerufen am 18. Oktober 2022]

Brühl, J. (2021) *In der Hitze des Geldes*, Verfügbar unter <<https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/bitcoin-krypto-ether-heizen-1.5219266>> [abgerufen am 10. November 2022]

BSI (o.D.) *Blockchain macht Daten praktisch unveränderbar*, Verfügbar unter <https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Verbraucherinnen-und-Verbraucher/Informationen-und-Empfehlungen/Technologien_sicher_gestalten/Blockchain-Kryptowaehrung/blockchain-kryptowaehrung.html?nn=131544> [abgerufen am 07. Dezember 2022]

Bundesnetzagentur (2021) *Die Blockchain Technologie*, Verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Digitalisierung/Technologien/Blockchain/Links_Dokumente/einfuehrung_bc.pdf?__blob=publicationFile&v=12> [abgerufen am 17. November 2022]

Budzinski, Prof. Dr. O. (o.D.) *Definition: Geld*, Verfügbar unter <<https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/geld-32540>> [abgerufen am 28. Dezember 2022]

Canada (o.D.), Verfügbar unter <<https://lowcarbonpower.org/region/Canada>> [abgerufen am 13. Dezember 2022]

Cardano (o.D.), Verfügbar unter <<https://coinmarketcap.com/currencies/cardano/>> [abgerufen am 21. November 2022]

CCRI (2022a), *The Merge – Implications on the Environmental Sustainability of Ethereum*, Verfügbar unter <<https://carbon-ratings.com/>> [abgerufen am 20. Dezember 2022]

Christoph, J. (o.D.) *Deine Infoseite für Mining-Hardware*, Verfügbar unter <<https://hardware-mining.de/>> [abgerufen am 18. Oktober 2022]

Climatetrade (o.D.), Verfügbar unter <<https://www.algorand.com/de/ecosystem/use-cases/climatetrade>> [abgerufen am 27. Dezember 2022]

De Best, R. (2022c) *Ethereum average energy consumption per transaction compared to that of VISA as of September 22, 2022.*, Verfügbar unter <<https://www.statista.com/statistics/1265891/ethereum-energy-consumption-transaction-comparison-visa/>> [abgerufen am 28. November 2022]

De Best, R. (2022b) *Ethereum (ETH)—Statistics & facts*, Verfügbar unter <https://www.statista.com/topics/8807/ethereum-eth/#topicHeader__wrapper> [abgerufen am 07. Oktober 2022]

De Best, R. (2022a) *Bitcoin (BTC) price per day from October 2013 to October 5, 2022*, Verfügbar unter <<https://www.statista.com/statistics/326707/bitcoin-price-index/>> [abgerufen am 07. Oktober 2022]

De Vries, A. (2019) *Renewable Energy Will Not Solve Bitcoin's Sustainability Problem*, Verfügbar unter <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S254243511930087X>> [abgerufen am 13. Oktober 2022]

De Vries, A., und C. Stoll (2021, September 13) *Bitcoin's growing e-waste problem*, Verfügbar unter <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344921005103>> [abgerufen am 14. Oktober 2022]

Demmer, A. (2021) *Kryptowährung als Zahlungsmittel: El Salvador im Bitcoin-Fieber?*, Verfügbar unter <<https://www.tagesschau.de/wirtschaft/finanzen/bitcoin-el-salvador-101.html>> [abgerufen am 07. Oktober 2022]

Deutsche Bundesbank (2022) *Zahlungsverhalten in Deutschland 2021*, Verfügbar unter <<https://www.bundesbank.de/resource/blob/894078/aebb75f424c02846677ba50b0501ec5e/mL/zahlungsverhalten-in-deutschland-2021-data.pdf>> [abgerufen am 08. November 2022]

About (o.D.), Verfügbar unter <<https://digiconomist.net/about/>> [abgerufen am 29. September 2022]

Dogecoin (o.D.), Verfügbar unter <<https://coinmarketcap.com/currencies/dogecoin/>> [abgerufen am 14. November 2022]

Duden (o.D.) *Ökologisch*, Verfügbar unter <<https://www.duden.de/rechtschreibung/oekologisch>> [abgerufen am 09. November 2022]

Eine kurze Geschichte der Kryptowährung (o.D.), Verfügbar unter <<https://kriptomat.io/de/kryptowaehrungen/eine-kurze-geschichte-der-kryptowaehrungen/>> [aufgerufen am 30. September 2022]

Entwurf eines BMF-Schreibens: Einzelfragen zur ertragsteuerrechtlichen Behandlung von virtuellen Währungen und von Token - Bundesfinanzministerium - Service. (o.D.), Verfügbar unter <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/BMF_Schreiben/Steuerarten/Einkommensteuer/2021-06-17-est-kryptowaehrungen.html> [abgerufen am 28. Dezember 2022]

Environment Solana (o.D.), Verfügbar unter <<https://solana.com/de/environment>> [abgerufen am 14. Dezember 2022]

Ethereum (o.D.), Verfügbar unter <<https://coinmarketcap.com/currencies/ethereum/>> [abgerufen am 21. November 2022]

Ethereum Energy Consumption Index (2022), Verfügbar unter <<https://digiconomist.net/ethereum-energy-consumption/>> [abgerufen am 13. Dezember 2022]

Ethereum Energy Consumption Index Way Back Machine (2022), Verfügbar unter <<https://web.archive.org/web/20220731115755/https://digiconomist.net/ethereum-energy-consumption/>> [abgerufen am 17. Dezember 2022]

Ethereums Energieverbrauch (2022), Verfügbar unter <<https://ethereum.org>> [abgerufen am 19. Dezember 2022]

Europäische Zentralbank (o.D.) *Die Geschichte des Euro*, Verfügbar unter <https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/other/euro_became_our_moneyde.pdf> [abgerufen am 08. Oktober 2022]

Finkbeiner M., V. Bach und A. Lehmann (2018) *Environmental Footprint Der Umwelt-Fußabdruck von Produkten und Dienstleistungen*, Verfügbar unter <https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3712_95_337_environmental_footprint_bf.pdf> [abgerufen am 19. November 2022]

Finkler, V. (2022) *Jede relevante Dogecoin-Statistik 2022: Dogecoin-Prognose & Fakten*, Verfügbar unter <<https://cryptomonday.de/jede-relevante-dogecoin-statistik-dogecoin-prognose-and-fakten/>> [abgerufen am 02. Dezember 2022]

Forestcoin Cryptocurrency (o.D.), Verfügbar unter <<https://forestcoin.earth/?rc=FC000&fbrefresh=1672143538>> [abgerufen am 28. Dezember 2022]

FTX-Insolvenz und Bitcoin-Einbruch: El Salvador droht wohl Staatsbankrott (2022), Verfügbar unter <<https://www.finanzen.net/nachricht/devisen/gesetzliches-zahlungsmittel-ftx-insolvenz-und-bitcoin-einbruch-el-salvador-droht-wohl-staatsbankrott-11944482>> [abgerufen am 02. Dezember 2022]

Gallersdörfer, U. et al. (2022) *Energy Efficiency and Carbon Footprint of Proof of Stake Blockchain Protocols*, Verfügbar unter <<https://carbon-ratings.com>> [abgerufen am 12. Oktober 2022]

Gandal, N., J. T. Hamrick und M. Vasek (2021) *The rise and fall of cryptocurrency coins and tokens*, Verfügbar unter <<https://link-springer-com.ezproxy2.hsrw.eu/article/10.1007/s10203-021-00329-8>> [abgerufen am 19. November 2022]

Gold – alles andere als glänzend für die Umwelt (2022), Verfügbar unter <<https://www.wwf.de/themen-projekte/waelder/mining/gold-mining>> [abgerufen am 09. Dezember 2022]

Green Currency Interactive Tool (o.D.), Verfügbar unter <<https://xrpl.org/carbon-calculator.html>> [abgerufen am 19. Dezember 2022]

Günther, S., und M. Dutschmann (2017) *Bitcoin Mining—Wie gut erklären klassische Theorien Standortwahl und -verteilung?*, Verfügbar unter <<https://doi.org/10.15358/0340-1650-2017-6-22>> [abgerufen am 20. Oktober 2022]

- Hanegraaf, R. et al. (2018) *Life cycle assessment of cash payments*, Verfügbar unter <https://www.dnb.nl/media/b0opb0u1/working-paper-no-610_tcm47-379441.pdf> [abgerufen am 11. Oktober 2022]
- Heintz, P. (2022) *Wie hoch ist der Stromverbrauch von Bitcoin?*, Verfügbar unter <<https://blockchainwelt.de/stromverbrauch-von-bitcoin/>> [abgerufen am 28. September 2022]
- Hoppmann, D. (2022) *Trotz Verbot: Warum China immer noch eine Bitcoin-Mining-Macht ist*, Verfügbar unter <<https://www.btc-echo.de/news/trotz-verbots-warum-china-bitcoin-mining-macht-ist-143585/>> [abgerufen am 13. Dezember 2022]
- Horch, P. (2019) *Bitcoin-Kurs sinkt – Was ist passiert?*, Verfügbar unter <<https://www.btc-echo.de/news/bitcoin-kurs-sinkt-was-ist-passiert-72443/>> [abgerufen am 07. Oktober 2022]
- Hupel, L. (2021) *Proof of Stake: Klimafreundlicheres Kryptogeld*, Verfügbar unter <<https://www.heise.de/hintergrund/Proof-of-Stake-klimafreundlicheres-Kryptogeld-6147207.html>> [abgerufen am 30. September 2022]
- Imöhl, S. (2022) *Bitcoin-Kurs aktuell: Bitcoin fällt auf 17.000 Dollar zurück*, Verfügbar unter <<https://www.wiwo.de/finanzen/boerse/bitcoin-kurs-aktuell-bitcoin-faellt-auf-17-000-dollar-zurueck/27382428.html>> [abgerufen am 16. Dezember 2022]
- Janson, M. (2022) *Kryptowährungen auf Talfahrt*, Verfügbar unter <<https://de.statista.com/infografik/1939/marktkapitalisierung-von-kryptowaehrungen/>> [abgerufen am 07. Oktober 2022]
- Kasachstan Strompreise* (2022), Verfügbar unter <https://de.globalpetrolprices.com/Kazakhstan/electricity_prices/> [abgerufen am 13. November 2022]
- Kaucher, A. (2022) *Blockchain: Funktionsweise und Applikationsmöglichkeiten*, Verfügbar unter <<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15935.46247>> [abgerufen am 26. November]
- Kaulartz, Dr. M., & B. Holl (2022) *Ja zu Kryptowährungen, aber nur mit Regulierung!*, Verfügbar unter <<https://www.lto.de/recht/kanzleien-unternehmen/k/kryptowaehrungen-bitcoin-regulierung-micar-blockchain-dlt-insolvenz-handelsplattform-ftx/>> [abgerufen am 02. Dezember 2022]
- Kazakhstan* (o.D.), Verfügbar unter <<https://lowcarbonpower.org/region/Kazakhstan>> [abgerufen am 12. Dezember 2022]
- Kent, P. und T. Bain (2020) *Krypto-Mining für Dummies*, 2. Auflage, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- Kryptobörse FTX meldet Insolvenz an* (2022), Verfügbar unter <<https://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/kryptoboerse-ftx-meldet-insolvenz-an-a-9532a792-7c72-4b1a-bf60-4116e2a5fd60>> [abgerufen am 02. Dezember 2022]
- Lange, G. (2020) *Bitcoin: Warum folgen Altcoins meist der Preiskurve von BTC?*, Verfügbar unter <<https://block-builders.de/bitcoin-warum-folgen-altcoins-meist-der-preiskurve-von-btc/>> [abgerufen am 14. Oktober 2022]
- Leys, L. (2021) *Funktionsweise von Proof-of-Stake erklärt*, Verfügbar unter <<https://validvent.com/2021/08/11/funktionsweise-von-proof-of-stake-erklart/>> [abgerufen am 30. September 2022]

- Linder, T. und F. Dekker (2020) *MWST und Krypto-Token*, Verfügbar unter <https://novitafiscali.supsi.ch/1031/1/Linder%26Dekker_MWST%20und%20Krypto-Token.pdf> [abgerufen am 22. November 2022]
- Longchamp, Y. (2020) *Das Blockchain Trilemma*, Verfügbar unter <<https://cvj.ch/fokus/hintergrund/das-blockchain-trilemma/>> [abgerufen am 13. Dezember 2022]
- Metzger, J. (o.D.) *Konsensmechanismus*, Verfügbar unter <<https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/konsensmechanismus-54411>> [abgerufen am 27. Oktober 2022]
- Mining: Die Folgen des weltweiten Rohstoffabbaus* (2019), Verfügbar unter <<https://www.wwf.de/themen-projekte/waelder/mining>> [abgerufen am 09. Dezember 2022]
- Mita, M. et al. (2019) *What is Stablecoin: A Survey on Price Stabilization Mechanisms for Decentralized Payment Systems*, Verfügbar unter <<https://doi.org/10.1109/IIAI-AAI.2019.00023>> [abgerufen am 19. November 2022]
- Moreland, K. (2019) *Was ist Proof-of-Work?*, Verfügbar unter <<https://www.ledger.com/de/academy/blockchain/was-ist-proof-of-work>> [abgerufen am 02. Dezember 2022]
- Moreland, K. (2022) *Der Unterschied zwischen Coins und Tokens*, Verfügbar unter <<https://www.ledger.com/de/academy/crypto/der-unterschied-zwischen-coins-und-tokens>> [abgerufen am 02. Dezember 2022]
- Ouroboros*. (2022), Verfügbar unter <<https://cardano.org/ouroboros/>> [abgerufen am 28. November 2022]
- People's Republic of China* (o.D.), Verfügbar unter <https://lowcarbonpower.org/region/People%27s_Republic_of_China> [abgerufen am 12. Dezember 2022]
- Polkadot* (o.D.), Verfügbar unter <<https://coinmarketcap.com/currencies/polkadot-new/>> [abgerufen am 21. November 2022]
- Polygon* (o.D.), Verfügbar unter <<https://coinmarketcap.com/currencies/polygon/>> [abgerufen am 21. November 2022]
- Potor, M. (2021) *Darum hat Bitcoin ein riesiges Elektroschrott-Problem*, Verfügbar unter <<https://www.basichinking.de/blog/2021/10/05/bitcoin-elektroschrott/>> [abgerufen am 02. Oktober 2022]
- Rabe, L. (2022a) *Daten und Fakten zum Bitcoin*, Verfügbar unter <<https://de.statista.com/themen/2087/bitcoin/#dossierKeyfigures>> [abgerufen am 11. Oktober 2022]
- Rabe, L. (2022b) *Anzahl der sich im Umlauf befindlichen Bitcoins von Februar 2017 bis September 2022*, Verfügbar unter <<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/283301/umfrage/gesamtzahl-der-bitcoins-in-umlauf/>> [abgerufen am 14. Oktober 2022]
- Rathmann, S. (2022) *Ist Solana die schnellste Kryptowährung?*. Verfügbar unter <<https://cryptoticker.io/de/ist-solana-die-schnellste-kryptowaehrung/>> [abgerufen am 25. Oktober 2022]

- Rehberg, D. (2022) *Deutschland und Bitcoin Mining*, Verfügbar unter <<https://cryptoticker.io/de/ist-bitcoin-mining-illegal/>> [abgerufen am 20. Oktober 2022]
- Reinwald, R. (2022) *Die steuerliche Behandlung von Krypto-Assets*, Verfügbar unter <<https://doi.org/10.1007/978-3-658-39298-7>> [abgerufen am 22. November 2022]
- Russia* (o.D.), Verfügbar unter <<https://lowcarbonpower.org/region/Russia>> [abgerufen am 12. Dezember 2022]
- Samford, H., und L. Domingo (2019) *The Political Geography and Environmental Impacts of Cryptocurrency Mining*, Verfügbar unter <<https://jsis.washington.edu/news/the-political-geography-and-environmental-impacts-of-cryptocurrency-mining/>> [abgerufen am 23. September 2022]
- Sawaneh, I. (2021) *DigiCash*, Verfügbar unter <<https://tradinglexikon.com/lexikon/digicash/>> [abgerufen am 14. Oktober 2022]
- Schreder, T. (2018) *Das neue Geld*, München: Piper Verlag
- Schlatt et al. (2016) *Blockchain: Grundlagen, Anwendungen und Potenziale*, Verfügbar unter <https://www.fit.fraunhofer.de/content/dam/fit/de/documents/Blockchain_WhitePaper_Grundlagen-Anwendungen-Potentiale.pdf> [abgerufen am 03. Januar 2022]
- Schuster, S. (2022) *Grüne Coins—Welche Kryptowährungen sind umweltfreundlich?*, Verfügbar unter <<https://kryptoszene.de/kryptowaehrungen-kaufen/umweltfreundliche-kryptowaehrungen/>> [abgerufen am 28. September 2022]
- Šebesta, M. (2018) *IT and solar energy meet urban agriculture—A hybrid solar, server, urban farm*, Verfügbar unter <<https://www.globsec.org/sites/default/files/2018-07/Martin-Sebesta-IT-and-Solar-Energy-Meet-Urban-Agriculture---A-Hybrid-Solar-Server-Urban-Farm.pdf>> [abgerufen am 10. November 2022]
- Sinha D. (2022) *Top 10 Cryptocurrencies with a High Transaction Speed in 2022*, Verfügbar unter <<https://www.analyticsinsight.net/top-10-cryptocurrencies-with-a-high-transaction-speed-in-2022/>> [abgerufen am 19. Dezember 2022]
- Skalierbare Blockchain-Infrastruktur: Milliarden von Transaktionen* (o.D.), Verfügbar unter <<https://solana.com/de>> [abgerufen am 02. Dezember 2022]
- SolarCoin* (o.D.), Verfügbar unter <<https://solarcoin.org>> [abgerufen am 27. Dezember 2022]
- Staking mit Ethereum* (o.D.), Verfügbar unter <<https://ethereum.org/en/staking/>> [abgerufen am 28. Oktober 2022]
- Statista Research Department (2022) *Anzahl verfügbarer Kryptowährungen weltweit in ausgewählten Monaten von Juni 2013 bis September 2022*, Verfügbar unter <<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1018542/umfrage/anzahl-unterschiedlicher-kryptowaehrungen/>> [abgerufen am 07. Oktober 2022]
- Top 100 Kryptowährungen nach Börsenwert* (o.D.), Verfügbar unter <<https://coinmarketcap.com/de/>> [abgerufen am 27. Oktober 2022]
- Top-Stablecoin-Tokens nach Marktkapitalisierung* (o.D.), Verfügbar unter <<https://coinmarketcap.com/de/view/stablecoin/>> [abgerufen am 01. Dezember 2022]

United States (o.D.), Verfügbar unter <https://lowcarbonpower.org/region/United_States> [abgerufen am 12. Dezember 2022]

Wackerow, P. (2022) *Einleitung zu Ethereum*, Verfügbar unter <<https://ethereum.org/de/developers/docs/intro-to-ethereum/>> [abgerufen am 25. Oktober 2022]

Waldvogel, M. (2022) *Was ist Proof of History?*, Verfügbar unter <<https://marcel-waldvogel.ch/2022/04/05/proof-of-history-solana-blockchain/>> [abgerufen am 01. Januar 2023]

Was ist Polkadot. (o.D.), Verfügbar unter <<https://www.cryptolist.de/polkadot>> [abgerufen am 14. November 2022]

Was ist Polygon (o.D.), Verfügbar unter <<https://www.northcrypto.com>> [abgerufen am 14. November 2022]

Was ist Ripple (XRP) (o.D.), Verfügbar unter <<https://www.bitpanda.com/academy/de/lektionen/was-ist-ripple-xrp>> [abgerufen am 21. November 2022]

Wasserverschwender Landwirtschaft (2020), Verfügbar unter <<https://www.wwf.de/themen-projekte/fluesse-seen/wasserverbrauch/wasserverschwendung>> [abgerufen am 21. Dezember 2022]

Weltweite Strompreise: Deutscher Strom mit am teuersten (2021), Verfügbar unter <<https://www.verivox.de/strom/verbraucheratlas/strompreise-weltweit/>> [abgerufen am 11. Oktober 2022]

What is Proof of Burn (PoB)? (2020), Verfügbar unter <<https://academy.bit2me.com/en/what-is-proof-of-burn-pop/>> [abgerufen am 07. Dezember 2022]

Kleine Geschichte der Kryptowährungen (2021), Verfügbar unter <<https://bisonapp.com/blog/geschichte-kryptowaehrungen-anfaenge/>> [abgerufen am 14. Oktober 2022]

Zehle, S., L. Arndt, und S. Bormann (2007) *Unsichtbare Kosten: Ungleiche Verteilung ökologischer Risiken in der globalen Computerindustrie*, Verfügbar unter <https://publikationen.sulb.uni-saarland.de/bitstream/20.500.11880/23610/1/WEED_UnsichtbareKosten_klein_2007.pdf> [abgerufen am 09. Dezember 2022]

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Beke Westermann, dass ich die hier vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfsmittel angefertigt habe. Informationen, die anderen Werken oder Quellen dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, habe ich kenntlich gemacht und mit exakter Quellenangabe versehen. Sätze oder Satzteile, die wörtlich übernommen wurden, wurden als Zitate gekennzeichnet. Die hier vorliegende Arbeit wurde noch an keiner anderen Stelle zur Prüfung vorgelegt und weder ganz noch in Auszügen veröffentlicht. Bis zur Veröffentlichung der Ergebnisse durch den Prüfungsausschuss werde ich eine Kopie dieser Studienarbeit aufbewahren und wenn nötig zugänglich machen.

Datum

Ort

Unterschrift