

Blockchains nachhaltig gestalten

Vorschlag von nachhaltigkeitsorientierten
Entscheidungskriterien und eines
Verfahrenskonzepts für die Umsetzung
staatlich geförderter oder initiiertes
Projekte im Bereich Blockchain

Kurzstudie im Rahmen des Vorhabens
"Umwelt und Digitalisierung" des
Bundesministeriums für Umwelt, Natur-
schutz und nukleare Sicherheit (BMU)

Stephan Ramesohl

Julian Lauten-Weiss

Georg Kobiela

Herausgeber:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
www.wupperinst.org

Ansprechperson:

Dr.-Ing. Stephan Ramesohl
Forschungsbereich Digitale Transformation
Abteilung Kreislaufwirtschaft
stephan.ramesohl@wupperinst.org

Autoren:

Dr.-Ing. Stephan Ramesohl
Julian Lauten-Weiss
Dr. Georg Kobiela

„**Wuppertal Reports**“ sind Abschlussberichte aus Projekten, die von Auftraggebern zur Veröffentlichung freigegeben wurden. Sie sollen mit den Projektergebnissen aus der Arbeit des Instituts vertraut machen und zur Diskussion einladen. Das Wuppertal Institut achtet auf ihre wissenschaftliche Qualität. Für den Inhalt sind die Autorinnen und Autoren verantwortlich.

Das Projekt wurde im Zeitraum von Mai - November 2020 bearbeitet.

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

Ramesohl, S., Lauten-Weiss, J., & Kobiela, G. (2021). Blockchains nachhaltig gestalten - Vorschlag von nachhaltigkeitsorientierten Entscheidungskriterien und eines Verfahrenskonzepts für die Umsetzung staatlich geförderter oder initiiertes Projekte im Bereich Blockchain (Wuppertal Report Nr. 21). Wuppertal Institut.

Wuppertal, August 2021

ISSN 1862-1953

Dieses Werk steht unter der Lizenz „Creative Commons Attribution 4.0 International“ (CC BY 4.0).
Der Lizenztext ist abrufbar unter: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen	5
Tabellenverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	7
1 Einleitung – Problemaufriss	8
2 Möglichkeitsraum Blockchain	10
2.1 Einordnung des Technologietrends als sozio-technische Innovation	11
2.2 Charakterisierung der Blockchain als Distributed-Ledger-Technologie	12
2.3 Definition und Charakterisierung von prototypischen Anwendungen für Blockchain-Technologien	16
2.3.1 Werte, Währungen und Tokens	18
2.3.2 Transparenz und Nachverfolgung von Lieferketten	18
2.3.3 Peer-to-Peer (P2P) Transaktionsplattformen	19
2.3.4 Verifikation von Identitäten und Dokumenten	20
2.3.5 Internet of Things (IoT), Smart Contracts und Machine-to-Machine (M2M) Datenverarbeitung	20
2.4 Zwischenfazit – Möglichkeiten und Grenzen von Blockchain	21
3 Analyse der Umweltwirkungen von Blockchain	23
3.1 Recherche von Stand der Wissenschaft und Praxis zu Energieverbrauch und Umweltwirkungen von Blockchains (Studien Screening)	23
3.2 Bedeutung von Konsensmechanismen für ökologische Effekte – Alternativen zum energieaufwendigen PoW-Verfahren	26
3.2.1 Proof-of-Stake (PoS) als alternative Konsensmechanismen zum PoW	27
3.2.2 Ressourcen- und Energieverbrauch von PoS-Anwendungen	29
3.2.3 Weitere alternative Ansätze und Konsensverfahren	30
3.2.4 Umstellung von etablierten PoW-Blockchains auf PoS-Ansätze	32
4 Konzeption einer Nachhaltigkeitsbewertung von Blockchain-Lösungen	34
4.1 Anforderungen an die nachhaltige Gestaltung von Blockchain-Lösungen	35
4.2 Der Ansatz – Perspektive einer problemgerechten Technologiewahl	36
4.3 Zwischenfazit zur Technologiewahl	40
5 Vorschlag zu Kriterien und Verfahrenskonzept für die Nachhaltigkeitsbewertung	42
5.1 Charakterisierung der Kernanforderungen der Blockchain-Anwendung als Grundlage für die Technologieauswahl	43
5.2 Berücksichtigung ökologischer Kriterien im Projektdesign	45
5.3 Bewertung des (spezifischen) Nutzens von Blockchain-Anwendungen	47

5.4	Konsistenzcheck der Integration der Blockchain-Technologie in die Implementierungsumgebung	49
6	Fazit und Schlussfolgerungen	51
7	Anhang	53
8	Literaturverzeichnis	54

Verzeichnis von Abkürzungen

Abb.	Abbildung
BCH	Bitcoin Cash
BFT	Byzantine Fault Tolerance
BNB	Binance Coin
BSV	Bitcoin SV
BTC	Bitcoin
CoA	Chains of Activity
DASH	Dash
DOGE	Dogecoin
DPoA	Delegated Proof of Authority
DPoR	Delegated Proof of Reputation
DPoS	Delegated Proof of Stake
EOS	EOSIO
ETH	Ethereum
LTC	Litecoin
M2M	Machine-to-Machine
PBFT	Practical Byzantine Fault Tolerance
PoA	Proof of Authority
PoB	Proof of Burn
PoC	Proof of Cooperation oder Proof of Capacity
PoE	Proof of Existence
PoET	Proof of Elapsed Time
Pol	Proof of Importance
PoR	Proof of Research
PoS	Proof of Stake
PoSV	Proof of Stake Velocity
PoV	Proof of Validation
PoW	Proof of Work
PoX	Proof of Exercise bzw. Proof of Concepts
P2P	Peer-to-Peer, Person-to-Person
RPoS	Robust Proof of Stake
SCP	Stellar Consensus Protocol
Tab.	Tabelle
TPS	Transactions Per Second
TRX	TRON
USDT	Tether
WI	Wuppertal Institut für Klima Umwelt, Energie GmbH
XRP	Ripple
XTZ	Tezos

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1	Qualitative Einordnung verschiedener Konsensmechanismen hinsichtlich der Nachhaltigkeitskategorien ökologisch, sozial und ökonomisch, nach Eigelshoven et al. (2020) -----	29
Tab. 4-1	Zusammenfassende Statistiken der maximalen Transaktionen pro Sekunde (TPS) für verschiedene öffentliche Blockchains (Irresberger et al. 2020) -----	39
Tab. 4-2	Ranking von Public Blockchains (Irresberger et al., 2020, S. 29)-----	41
Tab. 7-1	Auflistung öffentlicher (public) Blockchains in angepasster Reihenfolge nach Marktkapitalisierung (Irresberger et al., 2020, S. 36)-----	53

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	Hype Cycle for Blockchain Business (Gartner, 2019)-----	10
Abb. 2-2	Digitale Lösungen als sozio-technische Innovationen (Ramesohl & Berg, 2019)-	12
Abb. 2-3	Aufbau verschiedener Distributed-Ledger-Technologien (Strohmayer & Reetz, 2019, S. 16)-----	13
Abb. 2-4	Charakterisierung verschiedener Arten von Blockchain-Lösungen (Carson et al., 2018)-----	15
Abb. 2-5	Übersicht der fünf prototypischen Anwendungsfälle von Blockchains-----	17
Abb. 2-6	Praxisbeispiele für Werte, Währungen und Tokens-----	18
Abb. 2-7	Praxisbeispiele für Transparenz und Nachverfolgung von Lieferketten-----	19
Abb. 2-8	Praxisbeispiele für P2P Transaktionsplattformen-----	19
Abb. 2-9	Praxisbeispiele für Verifikation von Identitäten und Dokumenten-----	20
Abb. 2-10	Praxisbeispiele für IoT, Smart Contracts und M2M Datenverarbeitung-----	21
Abb. 3-1	Energiebedarf von Bitcoin, Ethereum und VISA im Vergleich, in GWh/Jahr (eigene Darstellung nach de Vries, 2021a, 2021b; Visa Inc., 2020)-----	25
Abb. 3-2	Energiebedarf in Wh pro Transaktion von Bitcoin und Ethereum im Vergleich mit VISA (logarithmische Darstellung) (eigene Darstellung nach de Vries, 2021a, 2021b)-----	25
Abb. 3-3	Verschiedene Konsens-Mechanismen im Vergleich (Irresberger et al., 2020, S. 9 f.)-----	27
Abb. 3-4	Marktkapitalisierung und Konsensmechanismen der zehn größten Kryptowährungen (eigene Grafik mit Daten von CoinMarketCap, 2020)-----	33
Abb. 4-1	Die drei zentralen Attribute zur Charakterisierung von Blockchain-Lösungen-----	37
Abb. 5-1	Vier Schritte einer gestuften, qualitativen Plausibilitätsprüfung-----	42
Abb. 5-2	Entscheidungsbaum zur Evaluierung von Blockchain-Lösungen (eigene Darstellung nach Beck et al., 2019)-----	44
Abb. 5-3	Exemplarische Prüffragen für die Berücksichtigung ökologischer Kriterien im Projektdesign von Blockchain-Lösungen-----	46
Abb. 5-4	Verschiedene Grundausrichtungen von Blockchain- und DLT-Lösungen-----	48
Abb. 5-5	Verschiedene Grundausrichtungen von Blockchain- und DLT-Lösungen-----	48

1 Einleitung – Problemaufriss

Die Blockchain-Strategie der Bundesregierung sieht in der Blockchain-Technologie *"... eine der meistdiskutierten Innovationen der digitalen Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft. Durch Eigenschaften wie Dezentralität, Zuverlässigkeit, Fälschungssicherheit eröffnet sie ein breites Feld an innovativen Anwendungsmöglichkeiten und neuen Kooperationsformen"* (BMW i & BMF, 2019, S. 4).

Mit der Blockchain – und allgemein mit Distributed-Ledger-Technologien (DLT) – werden große Erwartungen verknüpft, die Prozesse der digitalen Welt des 21. Jahrhunderts neu zu organisieren, effizienter zu gestalten und bislang ungekannte Möglichkeiten für Transaktionen zwischen Beteiligten in Wirtschaft, Gesellschaft und Verwaltung zu ermöglichen.

Diese Chancen müssen genutzt werden. Gleichzeitig ist mit der Blockchain-Technologie wie mit allen anderen digitalen Lösungen die Herausforderung verbunden, die Technologien, Anwendungen und zugrundeliegenden Infrastrukturen nachhaltig zu gestalten und an Energieeffizienz, Klimaschutz und Ressourcenschonung auszurichten. Die Umweltpolitische Digitalagenda des BMU legt deshalb einen expliziten strategischen Schwerpunkt auf eine umweltgerechte Digitalisierung als unverzichtbare Voraussetzung für die Nutzung der Chancen der Digitalisierung für eine nachhaltige Entwicklung (BMU, 2020).

Handlungsbedarf besteht auch bei Blockchain-Anwendungen. Der Energieverbrauch des derzeit größten Blockchain-Netzwerks Bitcoin wird auf bis über 130 TWh/Jahr abgeschätzt, womit eine Größenordnung in Höhe des gesamten Jahresstrombedarfs von Ländern wie Argentinien erreicht würde (de Vries, 2021a). Blockchain-Anwendungen sind somit schon heute umweltpolitisch relevante Einflussgrößen und die zu erwartende Wachstumsdynamik erhöht den Handlungsdruck.

Die Blockchain-Strategie der Bundesregierung greift diese Herausforderung auf und formuliert hierzu das eindeutige Ziel, *"... nachhaltigkeitsbezogene Anforderungen zu einem wichtigen Entscheidungskriterium bei der Umsetzung staatlich geförderter oder initiiertes Projekte im Bereich Blockchain-Technologie (zu) machen"*.

Es ist das Ziel dieser Kurzstudie, geeignete Nachhaltigkeitskriterien zur Bewertung der Energieverbräuche und Umweltwirkungen von Blockchain-Anwendungen zu identifizieren sowie ein erstes Konzept für deren Implementierung bei der Umsetzung und Vergabe staatlich geförderter oder initiiertes Projekte vorzuschlagen. Im gegebenen Rahmen der Kurzstudie liegt der Fokus dabei auf der Übersicht relevanter Einflussfaktoren, möglicher Ansätze und der Skizzierung einer Vorgehensweise. Für weitergehende Analyse und Detaillierungen sind vertiefende Arbeiten erforderlich. Auch war es nicht die Aufgabe, die Einsatzmöglichkeiten von Blockchain-Lösungen an sich zu analysieren oder die besonderen Potenziale dieser Technologie für Nachhaltigkeitsstrategien zu bewerten.

Die Kurzstudie dient damit direkt der Umsetzung der dem BMU zugeordneten Maßnahme 2.6 der Blockchain-Strategie der Bundesregierung:

Maßnahme 2.6

Die Bundesregierung wird, insbesondere mit Blick auf die Klimaschutzziele, den Einsatz und die Weiterentwicklung nachhaltiger, energiesparender Blockchain-Anwendungen unterstützen. Vor der Umsetzung staatlich geförderter oder initiiertes Projekte im Bereich Blockchain-Technologie wird die Bundesregierung daher nachhaltigkeitsbezogene Anforderungen zu einem wichtigen Kriterium ihrer Entscheidungen machen. Die Bundesregierung wird unter Einbeziehung Sachverständiger prüfen, welche Aspekte hierbei zu berücksichtigen sind und inwieweit eine einfache, flexible und transparente Bewertungsmethodik realisiert werden kann. Entsprechende Kriterien können auch über Deutschland hinaus zum Vorbild werden.“

Die Kurzstudie baut auf den folgenden Leitfragen und Untersuchungsschritten auf:

<p>Was ist die Blockchain und was kann die Technologie leisten?</p> <p>Beschreibung des Möglichkeitsraums Blockchain</p> <p>Charakterisierung der Technologie und ihrer Funktionalität</p> <p>Definition und Charakterisierung von prototypischen Anwendungsbereichen (Use-Cases) und Beispiele für Blockchain-Technologien und -anwendungen</p>	<p>Kapitel 2</p>
<p>Welche Umweltwirkungen sind derzeit mit Blockchain verbunden - was sind die wesentlichen Einflussfaktoren?</p> <p>Recherche (Studienscreening) des Stands in Wissenschaft und Praxis zum Umweltverbrauch</p> <p>Analyse der Bedeutung von Konsensverfahren für die ökologischen Effekte und Diskussion von energieeffizienten Alternativen</p>	<p>Kapitel 3</p>
<p>Wie kann eine Nachhaltigkeitsbewertung von Blockchain-Anwendungen gestaltet werden?</p> <p>Synopse der Anforderungen an die nachhaltige Gestaltung von Blockchain-Lösungen</p> <p>Vorstellung eines Ansatzes aus Perspektive einer problemgerechten Technologiewahl</p>	<p>Kapitel 4</p>
<p>Wie könnten Leitlinien und ein Verfahren für die konkrete Nachhaltigkeitsbewertung von staatlich geförderten bzw. initiierten Blockchain Projekten aussehen?</p> <p>Verfahrensvorschlag für die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien</p>	<p>Kapitel 5</p>

2 Möglichkeitsraum Blockchain

Die Blockchain bzw. DLT-Technologie gilt als eine der Schlüsseltechnologien der kommenden Phase der Digitalisierung. Darauf aufbauende Konzepte wie Kryptowährungen, Token Economies und Machine-to-Machine-Economies stellen traditionelle Paradigmen von Transaktionen und Leistungsaustausch in Frage und eröffnen neue Potenziale, etablierte Systeme und Strukturen disruptiv zu verändern.

Während die theoretisch-konzeptionellen Grundlagen der Blockchain-Technologie schon länger in Fachkreisen diskutiert wurden, erhält das Thema seit Mitte der 2010er Jahre auch zunehmend öffentliche Aufmerksamkeit. Dies ist in erster Linie der rapiden Kursentwicklung der Kryptowährung Bitcoin zuzuschreiben, die im Jahr 2021 einen neuen temporären Höhepunkt erreichte (*Bitcoin-Euro | BTC/EUR | aktueller Wechselkurs*, o. J.). Analog dazu tauchen Kryptowährungen ab 2014 in Gartners *Hype Cycle for Emerging Technologies* auf (Gartner, 2019), einem breit zitierten Indikator für Technologietrends. Ab 2017 erscheint auch ein spezifischer Blockchain Hype Cycle mit differenzierten Anwendungsfällen (Use Cases) (vgl. Abb. 2-1).

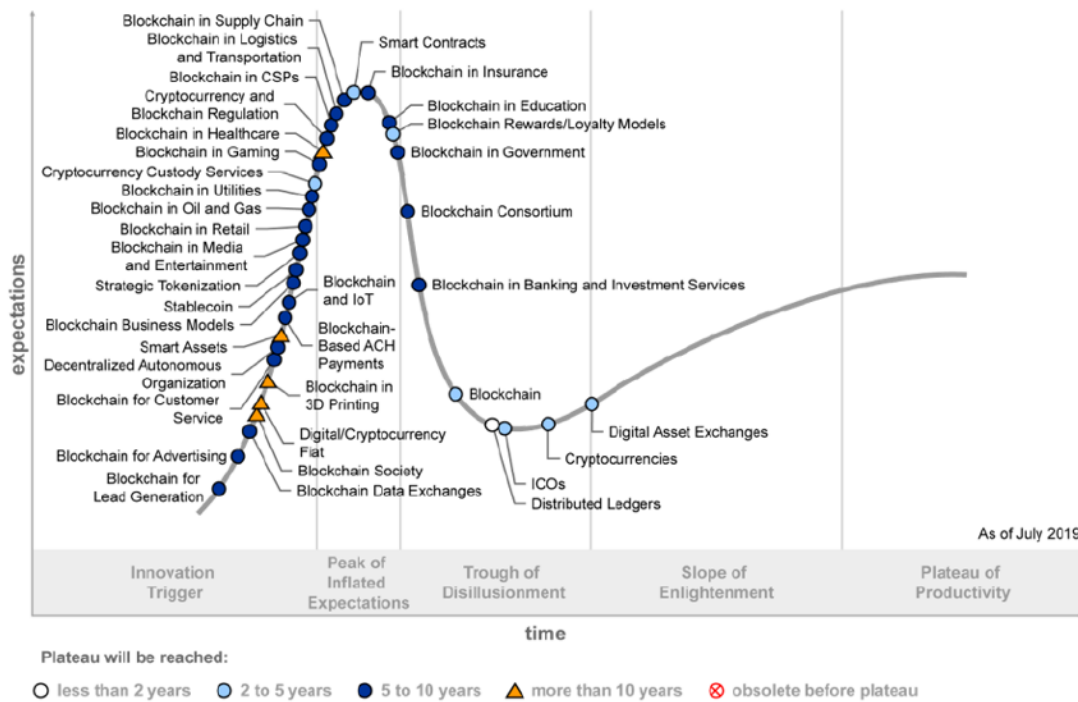


Abb. 2-1 Hype Cycle for Blockchain Business (Gartner, 2019)

Diese Entwicklung illustriert, dass sich die Technologie auch nach dem ersten Bitcoin-Hype in 2017 dynamisch weiterentwickelt und kontinuierlich neue Anwendungen erforscht und getestet werden. Nach Einschätzung von Gartner sind die ersten Komplettlösungen basierend auf Blockchain zu Beginn der 2020er zu erwarten und ab Mitte des Jahrzehnts ist mit vollintegrierten Anwendungen zu rechnen (Pemberton Levy, 2019). Diese Erwartung bestätigt auch eine Umfrage des World Economic Forum von 2015, in welcher der Wendepunkt für Blockchain-

Anwendungen durch Regierungen ab 2023 und eine weitläufige Adoption von Kryptowährungen gegen Ende der 2020er Jahre erwartet werden (O'Halloran et al., 2015, S. 6).

2.1 Einordnung des Technologietrends als sozio-technische Innovation

Für die Einordnung der Blockchain als Technologietrend sind zwei grundsätzliche Aspekte zu berücksichtigen (vgl. Abb. 2-2):

- Die Blockchain steht in der Regel nicht für sich, sondern wird in Kombination mit anderen Technologien der Datenerfassung wie Sensoren, der Datenübertragung zum Beispiel über mobile Kommunikationsnetze wie 5G und der Datenanalyse beispielsweise durch Verfahren der künstlichen Intelligenz (KI) angewendet. Es geht in den meisten Fällen daher um **digitale Lösungen** für spezifische Anwendungskontexte, für die ein digitales Ökosystem entwickelt wird, in dem eine Blockchain eingebettet ist und eine spezifische Funktion erfüllt.
- Blockchains als Teil von digitalen Lösungen sind – wie auch andere Schlüsseltechnologien der Digitalisierung – in ihrer Anwendung **sozio-technische Innovationen**. Das bedeutet, dass sie ihre besondere Wirkung vor allem durch Veränderungen im sozio-ökonomischen Raum entfalten, d.h. wenn sich durch ihre Anwendung das Verhalten von Nutzenden ändert, Prozesse neu gestaltet werden, neue Geschäftsmodelle und Marktformen entstehen oder sich Organisationen und Institutionen wandeln.

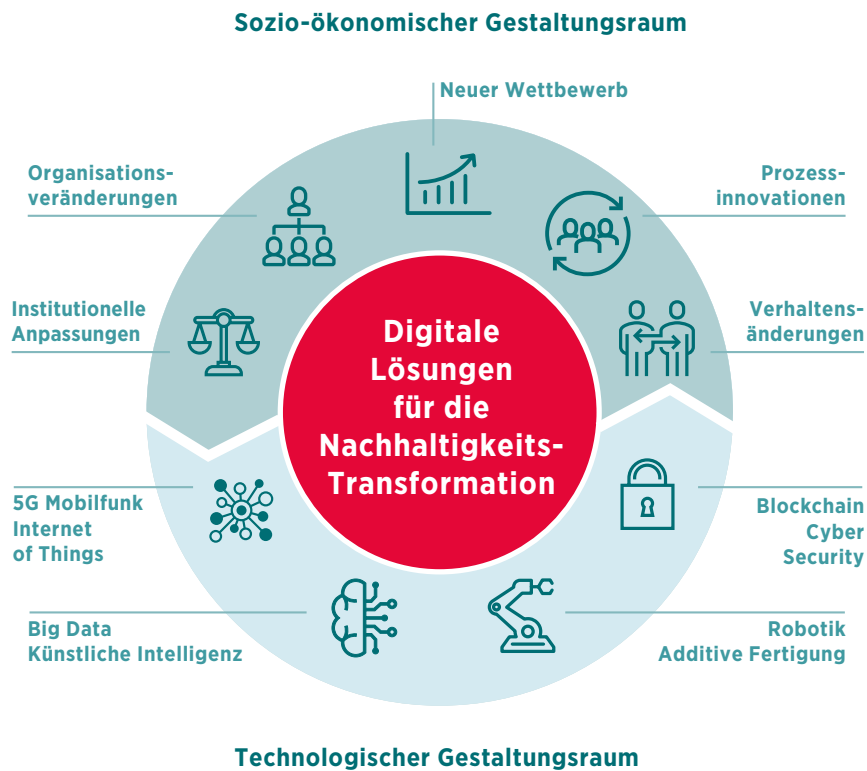


Abb. 2-2 Digitale Lösungen als sozio-technische Innovationen (Ramesohl & Berg, 2019)

Gerade der letzte Aspekt ist für Blockchain-Anwendungen von besonderer Bedeutung, da hier die Neugestaltung von kommerziellen oder administrativen Transaktionen im Mittelpunkt steht. Blockchain-Lösungen selbst sind sozio-technische Systeme, bei denen die Blockchain-Technologie die Regeln und Randbedingungen für soziale und ökonomische Transaktionen definiert, kontrolliert und absichert. Die Bewertung der Technologien und Anwendungsfälle muss damit konsequent von diesen sozio-ökonomischen Transaktionen, d.h. der Nutzung, hergedacht werden. Es geht damit nicht um die Technologie an sich, sondern um die Frage, welches Problem gelöst bzw. welcher Nutzen erreicht werden soll – und wie gut eine Technologie diese Anforderungen erfüllt.

Diese Perspektive wird in Kapitel 4.2 aufgegriffen.

2.2 Charakterisierung der Blockchain als Distributed-Ledger-Technologie

Auf der Grundlage von verschiedenen theoretischen und methodischen Vorarbeiten wurde im Jahr 2008 eine Blockchain-Technologie entworfen, um mit Bitcoin eine unabhängige, hierarchiefreie Kryptowährung zu erschaffen, die nicht von vermittelnden Dritten wie Banken abhängig ist. Dies sollte Transaktionskosten verringern sowie die Robustheit gegen Betrug erhöhen, indem jegliche Transaktionen in einem dezentralen Rechner-Netzwerk chronologisch dokumentiert und unveränderbar gespeichert werden. Seit der Entstehung von Bitcoin ist das Interesse an Konzepten der Distributed-Ledger-Technologie (DLT) stark gewachsen. Distributed Ledger bedeutet

wörtlich übersetzt „verteiltes Register“ und steht somit für generell alle dezentral aufgebauten Datenspeicher von gleichen Datensätzen. Somit ist Blockchain eine DLT mit der Besonderheit der kettenförmigen Verbindung von Datensätzen (Natarajan et al., 2017). Im Folgenden wird verallgemeinernd meist von Blockchain als häufigsten Typus der DLT gesprochen.

Das technische Prinzip

Die Grundidee der Blockchain an sich ist sehr einfach: aus den Informationen über jede Transaktion wird gemeinsam mit einem Identifikator namens „Nonce“ eine Kennziffer generiert, die sich „Hash“ nennt. Dieser Hash wird wiederum mit einem Zeitstempel versehen und wird so zu einem ersten „Block“, der auf jedem Rechner im entsprechenden Blockchain-Netzwerk gespeichert wird. Alle weiteren Blöcke weisen die gleiche Struktur auf, jedoch beinhalten sie nicht nur den eigenen, neuen Hash, sondern auch den des vorherigen Blocks, wodurch nach einer Validierung der Übereinstimmung durch das Netzwerk die Datenstruktur einer Verkettung („Blockchain“) entsteht (Nakamoto, 2008). Neben den in der Regel linear ausgerichteten Blockchains gibt es noch weitere DLT Konzepte mit anderen Verknüpfungsstrukturen, wie z.B. die als „Tangle“ bezeichneten Directed Acyclic Graphs (DAG, s. Abb. 2-3 und Kap. 3.2.3).

Die Technologie hat mittlerweile auch außerhalb von Kryptowährungen wie Bitcoin Anwendung gefunden, wobei sich einige Anwendungsfälle von der demokratisierenden, hierarchiefreien Grundidee der ersten Blockchain entfernen und eigene Governancestrukturen entwickelt haben.

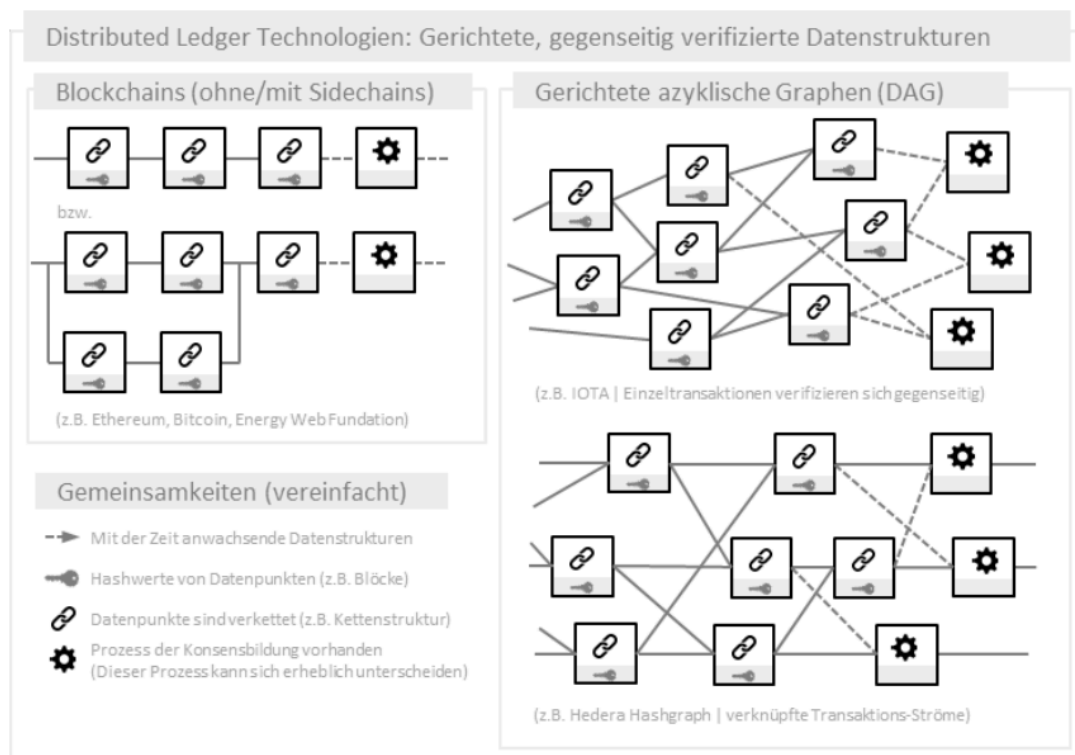


Abb. 2-3 Aufbau verschiedener Distributed-Ledger-Technologien (Strohmayer & Reetz, 2019, S. 16)

Das technologische Prinzip von Blockchain bzw. DLT-Lösungen ermöglicht, über den Hash-Wert Informationen zu speichern und zu dokumentieren. Dies können Informationen über Transaktionen der Kryptowährung entsprechend einer klassischen Banküberweisung sein. Es können aber auch andere Daten mit Zeitstempel gesichert werden wie z.B. die eindeutige Codierung von Datensätzen wie Patente oder Dokumente in Form eines "digitalen Fingerabdrucks" über den Hash-Wert in einer Blockchain. Außerdem lassen sich kurze Programmierungen, sogenannte Smart Contracts, in Hashs einbetten, die unter vorgegebenen Bedingungen automatisiert Transaktionen ausführen können (vgl. unten Exkurs Smart Contracts, Asselot, o. J.).

Die Charakteristik von Blockchain-Lösungen

Die Blockchain-Technologie ist vielfältig einsetzbar. Ungeachtet der vielfältigen Ausprägungen und Facetten geht es bei Blockchain- und DLT-Lösungen jedoch im Kern zumeist um die generische Aufgabe,

- **digitale Interaktionen zu organisieren** (d.h. die benötigten Informationen liegen in digitaler Form vor),
- mit **mehreren, unterschiedlichen Beteiligten** (d.h. es geht um die Koordination in Netzwerken oder größeren Gruppen),
- in **transparenter und nachvollziehbarer Form** (d.h. die Interaktionen müssen dokumentiert (gespeichert) werden und im Nachgang zugänglich sein),
- in **vertrauenswürdiger Form** (d.h. die Integrität der gespeicherten Daten ist gesichert),
- durch die **Feststellung einer allgemein akzeptierten "Wahrheit"** (d.h. in Fällen von Zweifel oder Interessenkonflikten besteht die Möglichkeit zum Abgleich mit einem Referenzpunkt), und
- durch ein **akzeptiertes Verfahren und/oder einer Instanz zu Konfliktlösung** (d.h. alle Teilnehmenden ordnen sich einer akzeptierten Governance unter).

Diese Merkmale sind je nach Anwendungsfall und Blockchain- oder DLT-Lösung unterschiedlich ausgeprägt. Eine grundlegende Differenzierung besteht in der Auswahl der Mitglieder eines Blockchain-Netzwerkes. Es lässt sich dabei zwischen öffentlichen und privaten Blockchains sowie zwischen Abstufungen der Zugriffsrechte (permissions) unterscheiden (Klebsch et al., 2019, S. 6 f.):

- Bitcoin basiert beispielsweise auf einer öffentlichen Blockchain, auf die alle zugreifen und eigene Transaktionen durchführen können (**public permissionless**).
- Öffentliche Blockchains mit Zugriffsbeschränkungen (**public permissioned**) unterliegen zuvor festgelegten Rahmenbedingungen und Regeln, denen alle Beteiligten folgen müssen.

- Private Blockchains mit Zugriffsbeschränkungen (**private permissioned**) werden meist von Unternehmens-Konsortien verwendet. Diese Arten von Blockchain-Netzwerken haben eine limitierte Anzahl an Teilnehmenden, die eine individuelle Zugriffsberechtigung erhalten.
- Zuletzt gibt es private Blockchains, welche die aktive Beteiligung ihrer Mitglieder nicht beschränken (**private permissionless**). In diese Netzwerke muss man zwar zugelassen werden, kann daraufhin jedoch ohne Beschränkungen eigene Transaktionen durchführen.

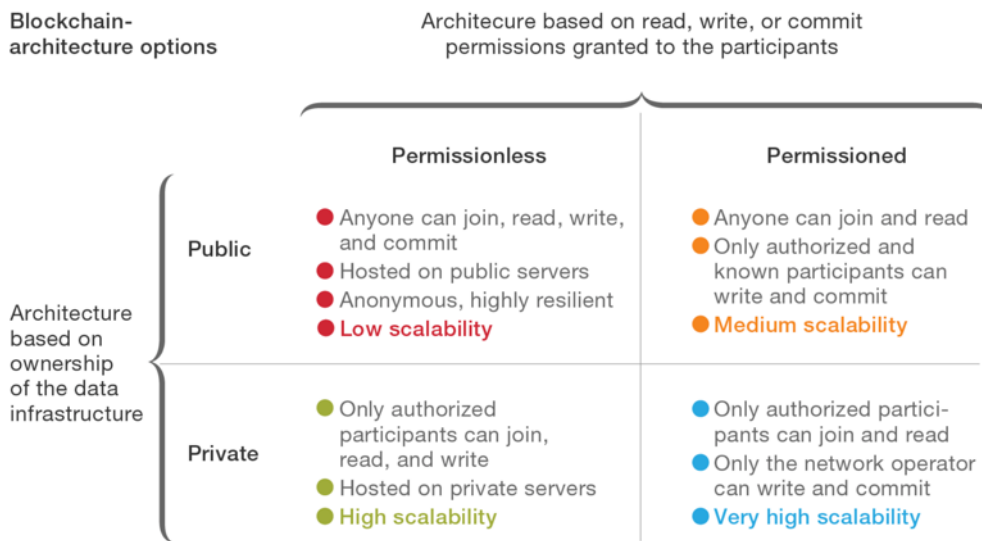


Abb. 2-4 Charakterisierung verschiedener Arten von Blockchain-Lösungen (Carson et al., 2018)

Exkurs: Smart Contracts (Programmable Blockchains)

Das Konzept von Smart Contracts wurde bereits 1996 von Nick Szabo erfunden und somit mehr als ein Jahrzehnt bevor Satoshi Nakamoto in 2008 den Bitcoin ins Leben rief. Szabo definiert Smart Contracts als „*a set of promises, specified in digital form, including protocols within which the parties perform on these promises.*“ (Szabo, 1996). Mittlerweile lassen sich Verträge über Blockchains abwickeln, indem Klauseln in ausführbare Computerprogramme umgewandelt werden, sobald die vorbestimmten Bedingungen erfüllt werden. Die daraus erfolgende Transaktion wird dann als unveränderbare Transaktion auf der Blockchain gespeichert. Während diese Technologie neue Peer-to-Peer (P2P) und Machine-to-Machine (M2M) Märkte ermöglichen sowie die Effizienz von Vertragsabwicklungen deutlich erhöhen kann, gibt es trotz fortwährender Entwicklungen noch einige Herausforderungen für die breite Anwendung von Smart Contracts. Zum einen lassen sich die auf einer Blockchain gespeicherten Programme nicht nachträglich ändern und müssen somit zu Beginn fehlerfrei programmiert werden. Zum anderen ist aufgrund der dezentralen Speicherung keine vollständige Privatsphäre gegeben. Auch sind die juristischen Grundlagen für die Vertragsbeziehungen von Smart Contracts in den meisten Ländern nicht gegeben. Weiterhin werden für die Abwicklung einiger Smart Contracts externe Dateninputs von sogenannten "Orakeln" (*Oracles*) benötigt, die beispielsweise die Ergebnisse von Sportwetten eintragen, damit die Wetterlöse per Smart Contract ausgezahlt werden können. Liefern diese Orakel jedoch (unbemerkt) fehlerhafte oder bewusst gefälschte Inputs, gibt es in den Smart Contracts einer Blockchain keinen eindeutigen Mechanismus, der dies erkennen und die Vertragsausführung stoppen könnte (Zheng et al., 2020).

2.3 Definition und Charakterisierung von prototypischen Anwendungen für Blockchain-Technologien

Die zentrale Funktion einer Blockchain bzw. DLT-Technologie zur Organisation von digitalen Interaktionen ist sehr universell einsetzbar. Es ergeben sich daher vielfältige mögliche Anwendungsfälle (Use Cases) in unterschiedlichen Ausprägungen und Zusammenhängen. In fast allen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Konstellationen lassen sich Ansatzpunkte für die Nutzung von Blockchains finden.

Die Blockchain-Strategie der Bundesregierung spricht dabei vom "*Einstieg in die Token-Economy*", denn "*mittels Blockchain-Technologie können alle erdenklichen Werte, Rechte und Schuldverhältnisse an materiellen und immateriellen Gütern durch Token repräsentiert und deren Handel- und Austauschbarkeit potenziell vereinfacht werden*" (BMW, BMF o.J.)

Gleichzeitig sind neue Lösungen für die zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts denkbar, z.B. mit Blick auf Klima- und Umweltschutz. Eine Studie des World Economic Forum (WEF) skizziert diese Potenziale unter dem Titel "Building block(chain)s for a better planet" (Herweijer et al., 2018). Umfangreiche Ansatzpunkte ergeben sich auch im Energiesystem z.B. bei der Vermarktung von regionalem Strom aus erneuerbaren Energien (BDEW, 2017; BDEW & pwc, 2019; dena et al., 2019) oder in der Entwicklungszusammenarbeit (GIZ et al., 2019; UNDP, 2018; Voshmgir et al., 2019).

Die große Bandbreite an Ideen, Konzepten und Projekten für die Nutzung von Blockchain-Technologien lässt sich dabei in fünf übergeordnete, prototypische Anwendungsfälle unterteilen (Abb. 2-5). Sie werden im Folgenden kurz skizziert und mit einigen Praxisbeispielen illustriert.¹

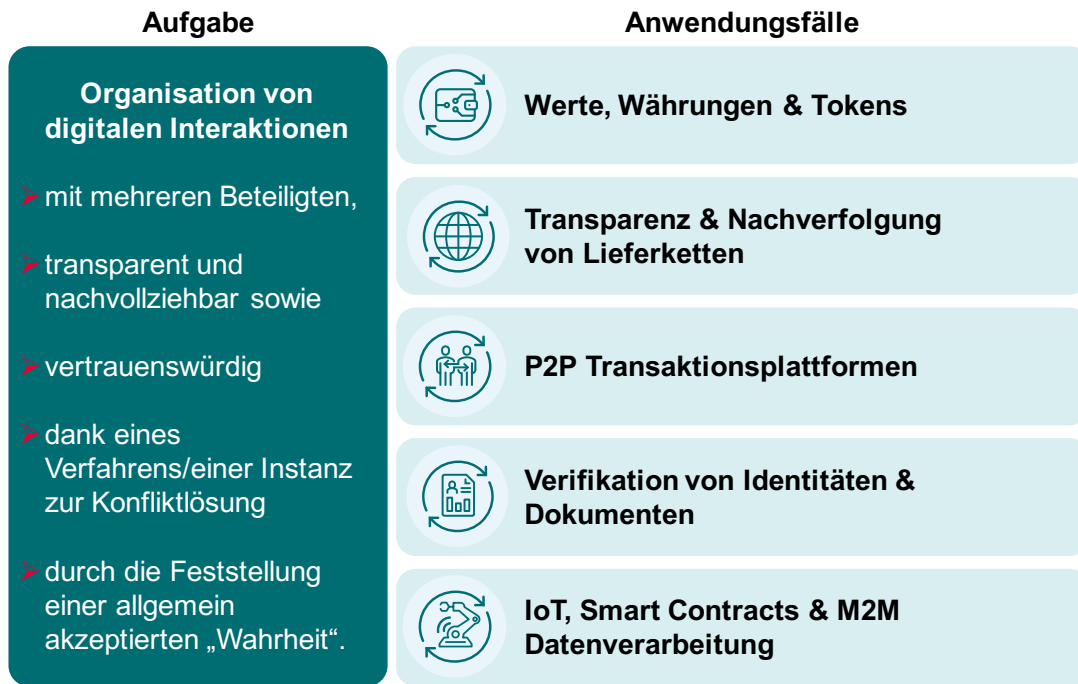


Abb. 2-5 Übersicht der fünf prototypischen Anwendungsfälle von Blockchains

¹ Die genannten exemplarischen Praxisbeispiele wurden in der Regel aufgrund von Selbstdarstellungen und dem Bezug zur Blockchain-Technologie in den Projektbeschreibungen ausgewählt. Eine weitergehende Untersuchung der spezifischen Technologie, der konkreten Implementierung und des Reifegrads sowie eine Bewertung des Umsetzungserfolgs konnte nicht durchgeführt werden. Dies müsste im Rahmen von tiefergehenden Recherchen und Analysen erfolgen.

2.3.1 Werte, Währungen und Tokens

Die erste Anwendung von Blockchain war der Bitcoin, welcher als erste "virtuelle" Währung nicht auf Vertrauen zwischen Menschen und Finanzinstitutionen, sondern auf unveränderbaren Beweisen von digitalen Transaktionen basiert (Nakamoto, 2008, S. 1). Mittlerweile gibt es diverse Kryptowährung sowie Token, mit denen Werte, Rechte und Schuldverhältnisse an materiellen und immateriellen Gütern repräsentiert und deren Verkehrsfähigkeit vereinfacht werden können (BMW i & BMF, 2019, S. 4).

 Werte, Währungen und Tokens		
BEISPIEL	KURZBESCHREIBUNG	LINK
AirCarbon	Eine Blockchain-basierte Handelsplattform für Kauf, Handel und Absicherung von CO ₂ -Emissionsgutschriften.	https://www.aircarbon.co/
ClimateTrade	Der Fokus dieser Plattform ist der CO ₂ -Ausgleich durch den Kauf von CO ₂ -Emissionsgutschriften sowie das Investieren in nachhaltige Projekte.	https://climatetrade.com/
e-Krona	Die Schwedische Reichsbank testet aktuell eine nationale Kryptowährung namens e-Krona, um unregulierten, nichtstaatlichen Alternativen zu klassischen Währungen entgegenzutreten.	https://www.riksbank.se/en-gb/payments-cash/e-krona/

Abb. 2-6 Praxisbeispiele für Werte, Währungen und Tokens

2.3.2 Transparenz und Nachverfolgung von Lieferketten

Die Möglichkeit, mit Blockchain-Technologie Informationen zuverlässig, verfolgbar und authentifiziert zu übermitteln, kann die Transparenz in Lieferketten deutlich erhöhen. Dabei können die Eigenschaften, die Qualität und Quantität, der Ort sowie die Besitzstrukturen von Produkten und Dienstleistungen nachverfolgt werden. Somit kann auch überprüft werden, ob Menschenrechte sowie Nachhaltigkeits- und Qualitätsstandards bis zum Ursprung des Produkts eingehalten werden. Typischerweise ist es nicht gewollt, dass Lieferketten-Netzwerke unbegrenzt öffentlich zugänglich sind, sodass hier meistens zugangsbeschränkte private Netzwerke mit einer limitierten Anzahl an Teilnehmenden Anwendung finden (Sabeti et al., 2019, S. 2120).


 Transparenz und Nachverfolgung von Lieferketten		
BEISPIEL	KURZBESCHREIBUNG	LINK
Fairfood Tracking	Fairfood bietet eine Blockchain-basierte Plattform an, auf der Unternehmen über die Herkunft ihrer Produkte berichten können.	https://fairfood.nl/en/fairtrace/
My Story™ von DNV GL	Produktinformationen werden mit einer ID versehen und auf der Blockchain von Vechain gespeichert, wonach sie über QR-Codes auf Produkten abrufbar sind.	https://www.dnvgl.com/mystory/index.html
IBM Food Trust	Food Trust ist ein zugangsbeschränktes (permissioned) Netzwerk für Transparenz und Effizienz entlang Lieferketten für Lebensmittel.	https://www.ibm.com/blockchain/solutions/food-trust

Abb. 2-7 Praxisbeispiele für Transparenz und Nachverfolgung von Lieferketten

2.3.3 Peer-to-Peer (P2P) Transaktionsplattformen

Peer-to-Peer (P2P) beschreibt direkte Interaktionen zwischen zwei oder mehr Netzwerk-Mitgliedern auf einer dezentralisierten Plattform, ohne dazwischengeschaltete Dritte für die Vermittlung zu benötigen. So können Fehler und Ineffizienzen reduziert sowie das Vertrauen der einzelnen Parteien erhöht werden (Sallaba et al., 2018, S. 8). Für Verträge zwischen zwei Personen müssten beispielsweise nicht mehr alle persönlichen sowie transaktionsspezifischen Informationen an Dritte (z.B. an eine Handelsplattform oder Marktplatzbetreiber) abgegeben werden, sondern könnten flexibel zwischen Kaufenden und Verkaufenden angefordert und ausgetauscht werden (Rafati Niya et al., 2018, S. 307 ff.). Viele Ideen und Pilotprojekte sind z.B. im Kontext dezentraler Energiesysteme entstanden.


 P2P Transaktionsplattformen		
BEISPIEL	KURZBESCHREIBUNG	LINK
Tal.Markt	Die Wuppertaler Stadtwerke (WSW) bieten einen Tarif an, mit dem man sich via einer privaten Blockchain den eigenen Strom-Mix zusammenstellen kann.	https://talmarkt.wsw-online.de
Power Ledger & Nicheliving	Einige Wohnprojekte in Australien werden mit Solaranlagen sowie einem Speichernetzwerk ausgestattet und können über die Power Ledger Plattform überschüssige Energie verkaufen.	https://www.powerledger.io/article/power-ledger-nicheliving-sign-3-year-deal-to-bring-blockchain-energy-trading-tech-to-wa-homes/
Brooklyn Microgrid Exergy	Die Blockchain-basierte (permissioned) Plattform bietet Privatpersonen die Möglichkeit, Energiehandel mit eigenen Solaranlagen zu betreiben.	https://www.brooklyn.energy/

Abb. 2-8 Praxisbeispiele für P2P Transaktionsplattformen

2.3.4 Verifikation von Identitäten und Dokumenten

Die Möglichkeit der eindeutigen und manipulationssicheren Verifikation von digitalen Identitäten und Dokumenten ist die Grundvoraussetzung für die weitere Digitalisierung von Verwaltungsprozessen und die digitale Interaktion mit öffentlichen Institutionen. Blockchains bieten diese Validierungsmöglichkeit zusammen mit der Option eines Zeitstempels (time stamping), z.B. für die Dokumentation einer Erstveröffentlichung von Patenten oder Publikationen. Zudem gibt es Projekte, in denen jegliche Ausbildungsnachweise in einem „Lifelong Learning Passport“ gespeichert und zugänglich gemacht werden (Gräther et al., 2018). Perspektivisch wäre es zudem möglich, Blockchain-basierte Wahlen durchzuführen (Nascimento et al., 2019, S. 91 ff.).

 Verifikation von Identitäten und Dokumenten		
BEISPIEL	KURZBESCHREIBUNG	LINK
Virgo	Zertifikate über Authentizität von Luxusgütern werden auf einer Blockchain gespeichert und können u. a. für den Weiterverkauf von Luxusgütern verwendet werden.	https://www.virgo.tech/
OriginStamp	Ein digitaler Fingerabdruck von Datensätzen wird erstellt und von OriginStamp mitsamt Zeitstempel in einer Blockchain gespeichert, um einen Beweis des jeweiligen Datenzustands zu bewahren.	https://originstamp.com/
Stadt Zug & uPort	Die Stadt Zug in der Schweiz hat in einem Pilotprojekt eine digitale ID getestet, die Personendaten nicht zentralisiert, sondern auf den Mobiltelefonen der Nutzenden speichert.	https://www.stadtzug.ch/digitaleid/5295 https://www.uport.me/

Abb. 2-9 Praxisbeispiele für Verifikation von Identitäten und Dokumenten

2.3.5 Internet of Things (IoT), Smart Contracts und Machine-to-Machine (M2M) Datenverarbeitung

Blockchain-basierte Smart Contracts versprechen transparente und vertrauenswürdige Transaktionen zwischen Maschinen ohne vermittelnde Dritte. Im Zeitalter des Internet der Dinge (Internet of Things / IoT) und der explosionsartig steigenden Zahl von vernetzten Geräten bietet sich so die Chance, Transaktionen in Größenordnungen abzuwickeln, die zuvor nicht praktikabel oder skalierbar gewesen wären. Zudem wird angenommen, dass Transaktionskosten durch Smart Contracts deutlich verringert werden könnten (Hanada et al., 2018, S. 6). Das Risiko fehlerhafter oder manipulierter Maschinen kann ebenfalls minimiert werden, indem die Authentizität der Datenquelle über eine Blockchain verifiziert wird (Yusuf et al., 2018, S. 4). Eine wichtige Akteurin für diese Art von Anwendung ist die IOTA Foundation (2017 in Berlin gegründet). IOTAs „Tangle“ läuft jedoch nicht auf einer Blockchain, sondern auf Directed Acyclic Graphs (DAG), wie in Abb. 2-3 dargestellt und in Kapitel 3.2.3 näher erläutert.

 IoT, Smart Contracts und M2M Datenverarbeitung		
BEISPIEL	KURZBESCHREIBUNG	LINK
Greyp & slock.it	Das Startup Greyp stellt Elektrofahräder her, die eigenständig ihren Verleih sowie Strom- und Mautzahlungen durchführen können.	https://www.greyp.com/ https://slock.it/
biOTAsphere	Die Technologie ermöglicht es Autos, eigenständig auf Basis der Nutzungsdaten passgenaue Versicherungsverträge abzuschließen und anzupassen.	https://biotasphere.com/poc-insure-my-car/
Commerzbank & Daimler	Das Pilotprojekt der beiden Partner dreht sich um die vollautomatische Abwicklung des Ladevorgangs elektrischer Lkw sowie des nachfolgenden Zahlungsvorgangs.	https://www.commerzbank.com/media/presse/archiv_1/mittellungen/2019_2/2019_08_08_PM_Atila_Pay_EN.pdf

Abb. 2-10 Praxisbeispiele für IoT, Smart Contracts und M2M Datenverarbeitung

2.4 Zwischenfazit – Möglichkeiten und Grenzen von Blockchain

Im vorangegangenen Abschnitt wurde deutlich, dass Blockchain- und DLT-Technologien im Sinne einer allgemeinen Basistechnologie (*general purpose technology*) breite Einsatzmöglichkeiten in den unterschiedlichsten Anwendungsfeldern bieten. Das besondere Potenzial der Technologie liegt dabei in der Möglichkeit, **Daten und Datentransaktionen eine Qualität hinsichtlich Vertrauenswürdigkeit und Integrität** zu geben. Neben der Fähigkeit Daten zu generieren und Daten zu analysieren, ist die Qualifizierung von Daten ein wichtiger Eckpfeiler für die datenbasierten Prozesse in Wirtschaft und Gesellschaft (vgl. Kapitel 2.1).

Für die Einordnung und Bewertung des Möglichkeitsraums von Blockchain- und DLT-Technologien ergeben sich daraus folgende Konsequenzen:

- Blockchains dokumentieren Daten und Transaktionen. Während es in der Blockchain technisch möglich ist, Transaktionen existierender Daten auf ihren Ursprung zurückzuverfolgen, erlaubt es eine Blockchain dagegen nicht, neue Daten an sich zu generieren. Dies bedeutet, dass jegliche Informationen bereits in digitaler Form vorliegen müssen. Die Qualität der Datengenerierung an der Schnittstelle zwischen physischer und digitaler Welt ist damit entscheidend für die Leistungsfähigkeit der Gesamtlösung.

- Blockchains sind kein Analyse-Werkzeug und können somit keine Aussagen über den Gehalt der gespeicherten Daten treffen oder komplexere Schlussfolgerungen ableiten. Folglich ist es aus konzeptioneller Sicht zwar möglich zu validieren, ob Datensätze seit ihrem Eintrag in die Blockchain nicht verändert wurden. Allerdings können auch falsche Daten auf Blockchains gespeichert werden und verbleiben ebenso unveränderbar wie korrekte Informationen, da lediglich vorherige Einträge als Referenzpunkte für die Validierung von Blöcken verwendet werden können. Besondere Chancen liegen deshalb in der Kombination von Blockchains mit z.B. KI-basierten Analysetools, die es erlauben, Blockchain-Inhalte durch die Analyse zusätzlicher Datensätze zu plausibilisieren.
- Blockchains repräsentieren eine Governancestruktur, die z.B. durch eine zentrale Entwicklungsinstanz vorgegeben ist und von allen Teilnehmenden akzeptiert wird – oder bspw. unter den Mitgliedern eines Konsortiums ausgehandelt wurde. Blockchains sind damit *per se* kein Ersatz für Governancestrukturen. Ihre Anwendbarkeit stößt an Grenzen, wenn Beteiligte aufgrund von krimineller Energie, Korruption oder fehlender Rechtsstaatlichkeit sich dieser Governance verweigern, die Prozesse bewusst manipulieren bzw. die aus der Blockchain abzuleitenden Implikationen ignorieren.
- Blockchains beschreiben und definieren mögliche Konsequenzen und Aktionen in der digitalen sowie physischen Welt als Datensatz. Die tatsächliche Ausführung, deren Steuerung und Qualitätssicherung liegt jedoch außerhalb der Blockchain. Ähnlich wie beim Dateninput ist deshalb auch bei der Nutzung der Blockchain-Inhalte das Zusammenspiel mit den nachgelagerten Prozessen und Systemen entscheidend für die Performance der Gesamtlösung.

3 Analyse der Umweltwirkungen von Blockchain

Die im vorangegangenen Kapitel skizzierten Anwendungsbereiche und Projektbeispiele illustrieren die Möglichkeiten, Chancen und positiven Erwartungen, die mit der Blockchain-Technologie verbunden werden. Darunter sind vielfältige Probleme und Herausforderungen der Umweltpolitik und der Entwicklungszusammenarbeit, für die neue Lösungen zur Senkung von Emissionen, Energie- und Umweltverbräuchen erwartet werden.

Gleichzeitig verursachen Blockchain-Lösungen wie jede andere digitale Technologie auch selbst ökologische Effekte, die für eine Gesamtbewertung mitberücksichtigt werden müssen. In diesem Kapitel 3 wird ein Überblick über aktuelle Studien und wissenschaftliche Arbeiten zu diesen Umweltwirkungen gegeben, um eine bessere Einschätzung der wesentlichen Aspekte, Einflussfaktoren und auch der quantitativen Größenordnung zu ermöglichen. Eine besondere Rolle spielt dabei der Validierungsprozess der Blockchain (Konsensmechanismus).

3.1 Recherche von Stand der Wissenschaft und Praxis zu Energieverbrauch und Umweltwirkungen von Blockchains (Studien Screening)

Die Diskussion zu den Umwelteffekten von Blockchain-Lösungen wurde vor allem durch die wachsende Zahl an Berichten über den hohen Energieverbrauch des Bitcoin-Netzwerkes angestoßen (de Vries, 2019a, 2020a; Mora et al., 2018; Stoll et al., 2019; Zohair, 2017). Kaum ein Artikel, welcher sich mit Nachhaltigkeitsaspekten von Blockchains oder anderer DLTs beschäftigt, kommt ohne eine mahnende Referenz bezüglich dieser Entwicklung aus, wie z.B. Reetz (2019).

Energie- und Ressourcenbedarf bei Bitcoin und Ethereum

In öffentlichen Blockchains wie Bitcoin oder Ethereum ist die unabhängige Validierung durch verschiedene Knoten im Netzwerk ein elementarer Teil des Funktionsprinzips des Netzwerks. Der mit der Validierung verbundene Rechenaufwand und Energieeinsatz wird somit zum integralen konstruktiven Bestandteil derartiger Blockchain-Lösungen.

Bitcoin

Haupttreiber für den hohen Energiebedarf des Bitcoin-Netzwerks ist der zugrundeliegende Validierungsmechanismus der einzelnen Blöcke, das sog. Proof-of-Work-Verfahren (PoW). Beim PoW-Verfahren müssen komplexe Rechenoperationen ausgeführt werden, deren einzige Funktion es ist, durch ihren immer höheren Schwierigkeitsgrad das Erzeugen (Minen) neuer Blöcke zu erschweren (Nakamoto, 2008).

Es existieren unterschiedliche Schätzungen zum **Energiebedarf von Bitcoin**, wobei die Schätzungen des digiconomist-Blogs von de Vries (2021a) in weiten Kreisen als Referenz zitiert werden. Die verursachten Treibhausgas-Emissionen betragen aufgrund des großen Anteils fossiler Energie (durchschnittliche Emissionsintensität 475 g CO₂-Äq/kWh) schätzungsweise ca. 62 Mt CO₂-Äq. Im Juni 2021 schätzt

de Vries (2021a) den jährlichen Energiebedarf von Bitcoin auf ca. 131 TWh, was etwa 62 Mt CO₂-Äq entsprechen würde.

Die Rechenzentren der Bitcoin-Miner werden üblicherweise in Vollauslastung rund um die Uhr betrieben – der einzige bestimmende Faktor ist hierbei das Verhältnis der Energiekosten zum finanziellen Gewinn durch neu geschürfte Bitcoins. Mining-Farmen werden weltweit jeweils dort errichtet, wo die Stromversorgung hinreichend verlässlich ist und die Energiekosten gering sind. Die Energiekosten machen dabei rund zwei Drittel der Gesamtkosten des Betriebs einer Mining-Farm aus.

Der **Ressourcenverbrauch des Bitcoin-Netzwerks** resultiert aus den hohen Anforderungen an die Rechenleistung der eingesetzten Hardware. Die zu berechnenden kryptographischen Rätsel werden dabei auf speziellen, hierfür entwickelten und nur zu diesem Zweck einsetzbaren Chips, sogenannten ASICs (application-specific integrated circuits), ausgeführt. Die ASICs unterliegen einem fortwährenden Entwicklungswettbewerb und müssen nach spätestens 1,5 Jahren ausgetauscht werden (de Vries, 2020b; Koomey et al., 2011), da sich nach dieser Zeit die Performance neuerer Chips so stark fortentwickelt hat, dass sie nicht mehr wirtschaftlich zu betreiben sind. Werden die ASICs nicht mehr für das Mining genutzt, werden sie dadurch unmittelbar zu Elektroschrott (de Vries, 2019a). Dadurch fallen nach grober Schätzung jährlich etwa 8 kt Elektroschrott (de Vries, 2021a) an, d.h. etwa 0,025 % des weltweiten E-Abfalls, der nur zu ca. einem Fünftel recycelt wird (Johnson, 2017). Diese Schätzungen sind geringer als diejenigen vergangener Jahre (de Vries, 2020b). Hierbei wurden ausschließlich die ASICs einbezogen und anderes, eher langlebigeres Equipment wurde nicht berücksichtigt. Für das Jahr 2018 wird dieser Ressourcenverbrauch auf ca. 100 Gramm pro Bitcoin Transaktion abgeschätzt, im Vergleich dazu wird der Elektroschrott für jede VISA Transaktion auf 0,0045 Gramm geschätzt (de Vries, 2019a, 2021a).

Ethereum

Neben Bitcoin nutzt auch die aktuell zweitgrößte Blockchain **Ethereum** das PoW-Verfahren als Validierungsmechanismus. Allerdings wendet Ethereum das Ethash Verfahren an, einen "ASIC-resistenten" Proof-of-Work-Algorithmus (Wood, 2014). Während ASICs zur Industrialisierung des Bitcoin-Minings führten, erfolgt das Ethereum-Mining mit Grafikkarten (GPUs), die in jedem Heimcomputer zu finden sind. Der durchschnittliche Strompreis, der zumindest noch vor wenigen Jahren für das Bitcoin-Mining gezahlt wurde, wird auf etwa 4,5 €-Cent pro kWh geschätzt, während man davon ausgeht, dass die Ethereum-Miner zum gleichen Zeitpunkt durchschnittlich 9 Cent pro kWh zahlten (de Vries, 2019a).

Für Ethereum belaufen sich die Schätzungen des aktuellen jährlichen Energieverbrauchs (de Vries 2021b) auf ca. 53 TWh (siehe Abb. 3-1). Aufgrund der Weiterverwendbarkeit und längeren möglichen Nutzungsdauern der eingesetzten GPUs besteht zudem die Hoffnung, dass der materielle Fußabdruck des Ethereum-Mining geringer ausfällt. Hierzu liegen allerdings keine Daten vor. Die durch das Ethereum-Mining verursachten CO₂-Emissionen belaufen sich auf ca. 25 Mt CO₂ (de Vries, 2021b).

Bewertung und Vergleich

Der Gesamtenergiebedarf von Bitcoin und Ethereum ist in Abb. 3-1 im Vergleich mit dem weltweiten Energiebedarf von Transaktionen im VISA-System dargestellt. Dies unterstreicht die umweltpolitische Relevanz des Themas und die Notwendigkeit, bessere Datengrundlagen zu schaffen und offene Fragen von Doppelzahlungen, bislang unberücksichtigten Infrastrukturen usw. durch weitere Forschung zu klären.

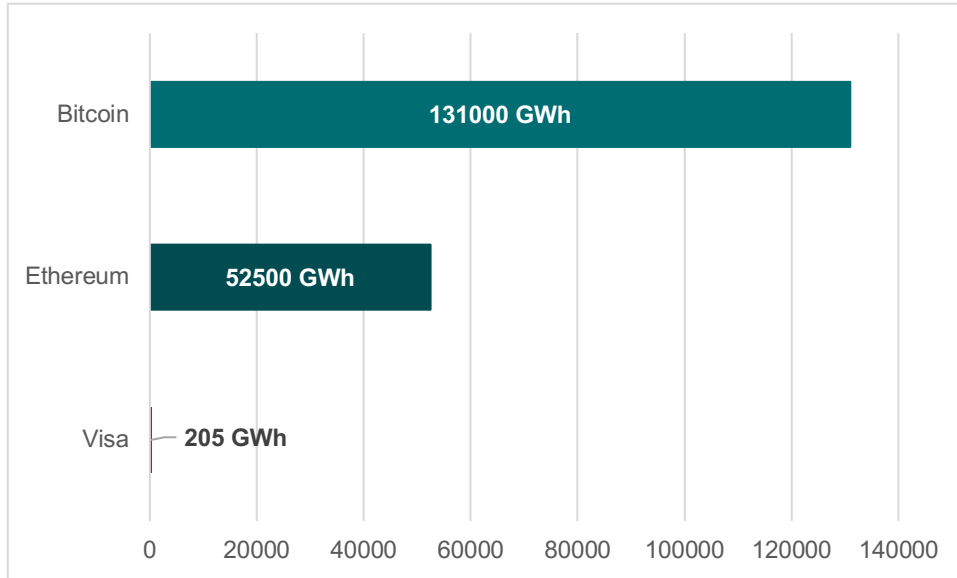


Abb. 3-1 Energiebedarf von Bitcoin, Ethereum und VISA im Vergleich, in GWh/Jahr (eigene Darstellung nach de Vries, 2021a, 2021b; Visa Inc., 2020)

Aus diesen absoluten Werten ist nicht unmittelbar auf die Energieintensität rückzuschließen, da hierzu angemessene Vergleiche gezogen und Metriken etabliert werden müssen. Wird beispielsweise der Elektrizitätsbedarf pro Transaktion betrachtet, so kommt (de Vries, 2021a, 2021b) zu dem in Abb. 3-2 dargestellten Verhältnis (logarithmische Darstellung).

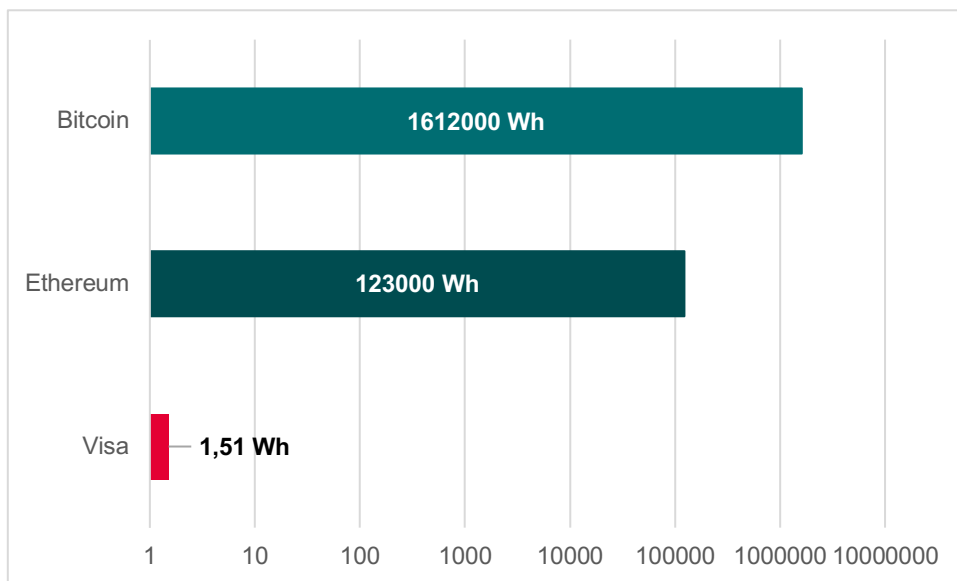


Abb. 3-2 Energiebedarf in Wh pro Transaktion von Bitcoin und Ethereum im Vergleich mit VISA (logarithmische Darstellung) (eigene Darstellung nach de Vries, 2021a, 2021b)

Ein derartiger Vergleich von Blockchain-Konzepten mit etablierten Transaktionssystemen wie Kreditkarten erfordert allerdings einen Bezug auf vergleichbare Funktionalitäten und Systemgrenzen. Aufgrund der geringen Anzahl an Transaktionen (als Vergleichsgröße zu Visa: 151 kWh für 100.000 Transaktionen) erscheint der ökologische Impact von Bitcoin sehr groß, eine einzelne Transaktion dürfte mit ca. 1610 kWh Energie beladen sein (de Vries, 2021a). Legt man seinen Geldwert zugrunde, scheint der klimatische Fußabdruck von Bitcoin eher in der Größenordnung von Gold oder mittlerweile sogar darüber zu liegen (McCook, 2015).

Es ist z.B. eine offene Diskussion, ob Bitcoin eher als ein Transaktionsmedium vergleichbar mit Bargeld bzw. Online-Überweisungen wie im Visa-System angesehen werden sollte, oder eher wie ein (spekulatives) Investment ähnlich wie Gold. Als Ersatz für ein Währungssystem inkl. des Bankensektors stellt sich dagegen die Frage, ob neben der Rechenleistung der Transaktion auch die Infrastruktur im Hintergrund wie Zentralbanken, Druckereien, Geldtransporte, Bankfilialen etc. ersetzbar werden könnte. Damit würden sich die Bilanzierungsgrenzen und Bewertungsmethoden zugunsten von Kryptowährungen verschieben. McCook (2015) schätzt zum Beispiel, dass der gesamte Bankensektor bis zu 650 TWh Energie pro Jahr verbrauchen könnte (inkl. Geldautomaten etc.).

3.2 Bedeutung von Konsensmechanismen für ökologische Effekte – Alternativen zum energieaufwendigen PoW-Verfahren

Das Beispiel der Bitcoin-Blockchain verdeutlicht die Bedeutung der Technologiewahl des Konsensverfahrens für den benötigten Aufwand an Rechenleistung und somit auch für den Energiebedarf einer Blockchain. Durch den hohen Energie- und Ressourcenaufwand von PoW Verfahren (de Vries, 2019a; Mora et al., 2018) und die damit verbundenen negativen sozialen Auswirkungen (Benetton et al., 2019) wurde in den letzten Jahren die Suche nach alternativen Ansätzen verstärkt.

Der Proof-of-Work (PoW) Mechanismus war in der Anfangszeit der Blockchain bis 2015 dominant, mittlerweile ist der relative Anteil an Blockchain Anwendungen mit diesem Konsensmechanismus allerdings deutlich abnehmend. Von allen vor dem Jahr 2015 angekündigten öffentlichen Blockchains verwenden 50% das PoW-Verfahren, aber nur noch 30% aller nach 2015 angekündigten öffentlichen Blockchains setzen auf PoW (vgl. Abb. 3-3). Mittlerweile dominiert PoW nicht mehr als Konsensprotokoll für Blockchains (wie es vor 2015 der Fall war), aber kein spezifisches Protokoll hat die dominierende Stellung von PoW übernommen. Seit 2015 wird bei neuen Anwendungen verstärkt mit verschiedenen Ausprägungen von Proof of Stake (PoS) gearbeitet und bei kürzlich eingeführten öffentlichen Blockchains kommen häufig Nicht-Standardprotokolle zum Einsatz (Irresberger et al., 2020).

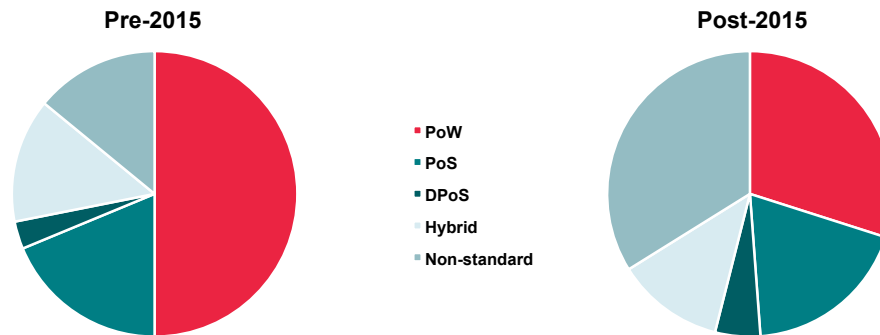
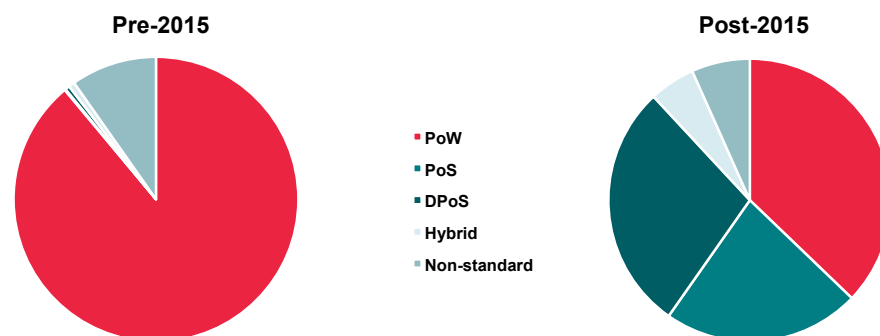
Anteil verschiedener Konsens-Mechanismen (in Zahl neuer Blockchains)**Marktanteil verschiedener Konsens-Mechanismen (in US-\$)**

Abb. 3-3 Verschiedene Konsens-Mechanismen im Vergleich (Irresberger et al., 2020, S. 9 f.)

3.2.1 Proof-of-Stake (PoS) als alternative Konsensmechanismen zum PoW**Proof-of-Stake (PoS)**

King und Nadal (2012) lieferten den ersten PoS-Entwurf und das erste reine PoS-Protokoll wurde 2013 in der NXT-Blockchain eingesetzt. PoS vermeidet den übermäßigen Energieaufwand des PoW, indem es das rechenaufwändige Rätsel des PoW aus dem Konsensprozess herausnimmt. Unter PoS wird den Beteiligten pseudo-zufällig die Autorität übertragen, den nächsten Block zu validieren. Die Wahrscheinlichkeit, ausgewählt zu werden, hängt vom Einsatz ("Stake") einer Person ab. Der "Stake" bezieht sich im Allgemeinen auf den Gesamtbestand einer Person am systemeigenen Kryptowert (Irresberger et al., 2020), also der Kryptowährung oder dem Token, der auf einer Blockchain-Lösung gehandelt wird. Die Fähigkeit, Konsens mit niedrigen Blockbelohnungen (dem Verdienst aus dem Validieren von Transaktionen) zu erzeugen, unterscheidet PoS von PoW.

Laut Saleh (2020) führt PoS im Gegensatz zur gängigen Auffassung dabei nicht zu einer Vermögenskonzentration (siehe auch Rosu & Saleh, 2020). Allerdings kann das „Nothing-at-Stake-Problem“² theoretisch dazu führen, dass Blöcke auch validiert

² Das „Nothing-at-Stake-Problem“ beschreibt die Annahme, dass Validierende die Richtigkeit jeder Transaktion bestätigen, da der Validierung beim PoS keine Kosten gegenüberstehen, wie beim PoW für leistungsstarke Rechner und hohen

werden, wenn diese im Widerspruch zu anderen stehen. Dies kann jedoch vermieden werden, wenn Beteiligte ein Interesse am Erhalt ihrer als Stakes eingebrachten Assets haben. Beispiele für relevante PoS-Blockchains sind PIVX und WAVES oder auch NXT, Cardano, Dfinity, Cardano, Sp8de, Tezos und Cosmos.³

Hybrid PoW/PoS

Für einige Blockchains wurde versucht, sowohl PoW- als auch PoS-Protokolle zu kombinieren und damit die Vorteile beider Protokolle zu nutzen. Das erste derartige hybride Konsensprotokoll wurde 2012 in der Peercoin-Blockchain eingesetzt. Seitdem haben Dutzende weiterer Blockchains diesen Ansatz verfolgt. Zu den bekanntesten Hybrid-Protokollen gehören Dash und Decred. Diese beiden Blockchains setzen PoW ein, um Blöcke zu validieren, gewähren aber den Beteiligten Governance-Rechte auf der Grundlage ihres Anteils am systemeigenen Kryptowert. Zu diesen Leitungsrechten kann das Recht gehören, über Änderungen des Protokolls abzustimmen oder die Gültigkeit von Blöcken zu bestätigen (Irresberger et al., 2020). Auch das für Ethereum geplante Casper-Protokoll kann als ein Hybrid aus PoW und PoS begriffen werden (Nguyen et al., 2019).

Delegated Proof-of-Stake (DPoS)

Sowohl PoW- als auch reine PoS-Blockchains werden wegen ihrer angeblichen Unfähigkeit zur Skalierung, d.h. zur Bedienung einer hohen Rate von Transaktionen, kritisiert. Als Reaktion auf diese Kritik entstand eine Art von PoS-Protokollen, die unter der Bezeichnung "Delegated Proof-of-Stake" (DPoS) bekannt sind und als besonders gut skalierbar gelten.

Unter DPoS validiert eine feste Anzahl von Delegierten, auch "Zeugen" genannt, neue Blöcke. Die Eigner des systemeigenen Kryptowerts wählen die Delegierten. Ähnlich wie bei PoS wird die Anzahl der Stimmen im Verhältnis zu den Beständen des systemeigenen Kryptowerts vergeben. Die Befürwortenden dieses Konsensprotokolls bezeichnen es häufig als "digitale Demokratie", was seine Ähnlichkeit mit repräsentativen Demokratien unterstreicht. Die relativ kleine und feste Anzahl von Delegierten reduziert die Größe des Netzwerks von Validierenden im Vergleich zu traditionellen PoS-Protokollen. Diese geringe Netzwerkgröße ermöglicht schnellere Transaktionsraten, da weniger Beteiligte sich auf eine gemeinsame Version des Transaktionsprotokolls (Ledgers) einigen müssen (Irresberger et al., 2020).

Die Nutzung von DPoS-Blockchains übertrifft in der letzten Zeit die Nutzung von PoW-Blockchains, obwohl DPoS vor 2015 nur eine vernachlässigbare Präsenz hatte (Irresberger et al., 2020).⁴ Beispiele sind EOS, TRON oder EECoin (Energy

Stromverbrauch der Fall ist. So wäre es möglich dass Mitglieder der Blockchain auch verfälschte Daten validieren, nur um die Blockbelohnung zu erhalten (Saleh, 2020).

³ Siehe unter anderem: <https://www.cardano.org/en/home/>, <https://dfinity.org/>, <https://eos.io/>, <https://cosmos.network/>

⁴ Dazu (Irresberger et al., 2020): "DPoS appears to be PoW's primary alternative going forward".

Efficiency Coin), welche mit dem mit Tendermint-Protokoll operiert (Dispenza et al., 2017), sowie WAVES und Steem (Do et al., 2019).

3.2.2 Ressourcen- und Energieverbrauch von PoS-Anwendungen

Zur Ressourcen- oder Energielast von PoS-Anwendungen finden sich keine belastbaren quantitativen Aussagen. Generell wird PoS allerdings als „wasteless“ angesehen (Brown-Cohen et al., 2019) und Eigelshoven et al. (2020) bewerten PoS und DPoS Verfahren als energieeffizienter als PoW Lösungen (siehe Tab. 3-1). Serpell (2018) wies in diesem Zusammenhang vor zwei Jahren darauf hin dass es unklar sei, welches dieser alternativen Netzwerke, wenn überhaupt, erfolgreich ein sicheres und energieeffizientes Protokoll aufgebaut habe.

	Proof of Work	Proof of Stake	Delegated Proof of Stake
Ökologisch	- Hoher Energieverbrauch	+ Energieeffizient	+ Energieeffizient
Sozial	+ Alle Teilnehmenden können an der Konsensfindung partizipieren - Zentralisierung durch Mining Pools	- Höhe des Stakes hat direkten Einfluss auf Entscheidungsmacht der Teilnehmenden - Konsensfindung nur durch Beteiligte	+ Faire Prämienverteilung möglich - Zentralisierung durch Validierende - Konsensfindung nur durch gewählte Validierende
Ökonomisch	+ Prämien bei Blockverifikation - teure Hardware Investitionen - Skalierbarkeit und Effizienz	+ Prämien bei Blockverifikation + Keine teuren Hardware Investitionen - Nothing-at-Stake-Problem	+ Prämien bei Blockverifikation + Keine teuren Hardware Investitionen + Skalierbarkeit und Effizienz

Tab. 3-1 Qualitative Einordnung verschiedener Konsensmechanismen hinsichtlich der Nachhaltigkeitskategorien ökologisch, sozial und ökonomisch, nach Eigelshoven et al. (2020)

Bewertung alternativer Ansätze

In den letzten Jahren hat sich eine große Zahl alternativer Ansätze herausgebildet, in denen PoS und DPoS-Verfahren modifiziert und angepasst wurden. Belastbare quantitative Daten zu Energie- und Umweltverbrauch dieser Verfahren liegen dabei nicht vor. In der Literatur werden lediglich Richtungsangaben und Erwartungen an mögliche Effizienzgewinne gegenüber den etablierten Verfahren formuliert. Hier besteht Forschungsbedarf.

- **Robust Proof of Stake (RPOS)** ist eine Abwandlung des PoS-Mechanismus und verwendet die Menge der Coins zur Auswahl der Miner und begrenzt den Höchstwert des Coin-Alters. Dadurch kann RPOS die Transaktionsgeschwindigkeit weiter beschleunigen und löst das Sicherheitsproblem, dass die Knoten im PoS unbegrenzt Coin-Alter ansammeln und dadurch lange bestehende Stakes dominant werden können. RPOS soll potenziell energiesparender als PoW sein, schneller als PoS und robuster gegen PoS-

bezogene Angriffe wie Nothing-at-Stake-Angriffe und Coin-Age-Accumulation-Angriffe (Li et al., 2020).

- **Ouroboros** (Kiayias et al., 2017): Da nur die gewählten Personen mit Entscheidungsbefugnis Blöcke im Ouroboros schaffen können, ist der Energieverbrauch im Vergleich zu denen von PoW-basierten Netzwerken vernachlässigbar gering (Nguyen et al., 2019).
- **Chains-of-Activity (CoA)**: Ähnlich wie im Ouroboros-Protokoll gibt es nur eine designierte verantwortliche Person, die in jeder Runde einen Block bildet. Im CoA-Protokoll wird bei jeder Runde nur ein Block erstellt, so dass der Energieverbrauch im Vergleich zu den PoW-Mechanismen gering ist (Nguyen et al., 2019).
- **Algorand**: Obwohl in Algorand mehr als ein Block in jeder Runde erstellt wird, ist die Anzahl der erstellten Blöcke immer noch gering, und die Teilnehmenden konkurrieren nicht in der Hash-Rate, um Blöcke zu erstellen. Daher ist der Energieverbrauch des Algorand-Protokolls im Vergleich zu dem der PoW-Mechanismen gering (Nguyen et al., 2019).
- **Tendermint**: Ähnlich wie bei Algorand stimmen die Validierenden ab, um die vorgeschlagenen Blöcke in Tendermint zu bestätigen, so dass Blöcke und Transaktionen sofort abgeschlossen werden. Die Belohnungen für die Blöcke werden unter den Validierenden verteilt, um Anreize für Konsenspartizipation zu schaffen, und bei böswilligem Verhalten werden die Einlagen beschlagnahmt. Der Energieverbrauch des Tendermint-Protokolls ist im Vergleich zu PoW-Mechanismen gering, da in jeder Runde nur ein Block erstellt wird (Nguyen et al., 2019).

3.2.3 Weitere alternative Ansätze und Konsensverfahren

Non-standard Protocols (u.a. Ripple Consensus Algorithm)

Die Forschung zu neuen Konsensprotokollen ist ein aktives Feld. Zahlreiche vorgeschlagene Blockchain-Protokolle unterscheiden sich stark von den oben beschriebenen Protokollen. Diese sind hier als Nicht-Standardprotokolle zusammengefasst. Innerhalb dieser Gruppe ist kein bestimmtes Konsensprotokoll allgemein gebräuchlich. Die bekannteste öffentliche Blockchain innerhalb dieser Kategorie ist Ripple.

- **Ripple (XRP)** ist stark zentralisiert, weist aber eine hohe Sicherheit auf (Irresberger et al., 2020; Li et al., 2020; Saleh, 2020). Die Validierung von Transaktionen im Ripple-Netzwerk funktioniert durch Konsens einzelner Mitglieder, die jeweils für mehrere Knotenpunkte (nodes) verantwortlich sind. Dabei müssen sich mindestens 90% der Teilnehmenden über die Richtigkeit der zu validierenden Transaktionen einig sein (Chase & MacBrough, 2018).
- Bei **Proof of Exercise/Proof of Concepts (PoX)** (Nguyen et al., 2019; Shoker, 2017, 2018) werden im Gegensatz zu PoW „nützliche“ Rechenoperationen ausgeführt und die gelösten Probleme werden anschließend öffentlich zur Verfügung gestellt. Dies sind im Wesentlichen Matrixoperationen, wie z.B. Proteinfaltungen.

- **Proof of Space**, angewandt z.B. von Spacemint, versucht den eskalierenden Energieaufwand von PoW dadurch einzuhegen, dass die Konsensknoten einen Nachweis der Speicherung erbringen müssen, wenn sie am Prozess der Lösungssuche teilnehmen. Anders als bei PoX sind die gespeicherten Dateien nicht nützlich und dienen nur als Beweise. Immerhin verbraucht die Speicherung einer großen Datei im Vergleich zu PoW vernachlässigbar wenig Energie, allerdings fällt erhöhter Speicherbedarf an, welcher evtl. selbst wiederum einen Wettbewerb auslösen kann (Nguyen et al., 2019).
- **Proof of Elapsed Time (PoET)** wurde von Intel entwickelt und setzt spezielle Hard- sowie Software des Unternehmens voraus, die eine zufällige Wartezeit vorgibt, nach welcher ein Mitglied des Netzwerks eine Transaktion validieren darf. Daraufhin wird eine Bescheinigung erstellt, die alle Teilnehmenden überprüfen können. Dieser Prozess wird durch das Zusammenspiel von Software und spezifischer Hardware gesichert, ist jedoch dadurch auch an ebendiese gebunden (Chen et al., 2017).
- Der **Proof of Authority (PoA)** wurde für private, zugangsbeschränkte (private, permissioned) Blockchains entworfen. Hier wird einzelnen Teilnehmenden das Recht erteilt, alleine die Transaktionen des Netzwerks zu validieren. Die jeweiligen Autoritäten müssen sich dafür identifizieren und können somit für Betrug verantwortlich gemacht werden. Der PoA gehört zu den byzantinischen Konsensmechanismen, die ihren Namen von der Geschichte der byzantinischen Generäle haben. Hierbei geht es darum, trotz abtrünniger Mitglieder im Netzwerk einen validen Konsens zu erreichen und eine möglichst hohe Fehlertoleranz zu erzielen. Dies soll durch mehrere Abstimmungsrunden erfolgen, die einen relativ hohen Kommunikationsaufwand erfordern. Da dieser Mechanismus eine hohe Effizienz durch Zentralisierung ermöglicht, ähnelt er somit dem klassischen Modell, in dem Transaktionen über Banken oder vergleichbare Dritte laufen (De Angelis et al., 2018, S. 3 f.).
- Einige weitere, jedoch weniger erforschte und angewandte Konsensmechanismen, sind der Proof-of-Research (PoR), Proof-of-Burn (PoB), Proof-of-Stake-Velocity, Proof-of-Cooperation (PoC), Proof-of-Importance (PoI), Proof-of-Validation (PoV), Proof-of-Existence (PoE), die Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT), das Stellar Consensus Protocol (SCP) sowie der Proof-of-Capacity (PoC) oder Proof-of-Storage (De Angelis et al., 2018; Ferdous et al., 2020).

Directed Acyclic Graph (DAG)

Das auf dem „Tangle“, einem Directed Acyclic Graph (DAG), aufbauende IOTA-Netzwerk ist speziell für IoT-Anwendungen zugeschnitten und hat in diesem Zusammenhang u.a. Datenschlankheit als Zielsetzung (Popov, 2017). Es ist so konzipiert, dass jede Transaktion erst dann abgeschlossen werden kann, wenn die Teilnehmenden an dieser Transaktion mindestens zwei zuvor abgeschlossene Transaktionen überprüft haben. Auf diese Weise werden zuvor ausgeführte Transaktionen unabhängig voneinander durch eine Anzahl späterer Transaktionen verifiziert, wobei ein Bruchteil der

Rechenleistung anderer Verifizierungsmethoden verwendet wird (Serpell, 2018). Dies ist mit dem Trade-off erkauft, dass eine gewisse Zentralität bestehen bleibt (Sønstebo, 2017; Wall, 2017).

3.2.4 Umstellung von etablierten PoW-Blockchains auf PoS-Ansätze

Ungeachtet der unzureichenden Datenlage zeichnet sich ab, dass PoS-Ansätze und insbesondere neuere Varianten erhebliche Energieeffizienzgewinne gegenüber klassischen PoW-Verfahren versprechen. Für neue Use Cases wird daher von Beginn an immer stärker auf diese Verfahren gesetzt (vgl. Kapitel 3.2.1). Der Markt für öffentliche Blockchains wird jedoch weiterhin von den historisch etablierten PoW-basierten Ketten Bitcoin und Ethereum dominiert – die Erfolge von PoS-Varianten von neueren Blockchains in jüngster Zeit konnten daran noch wenig ändern (Abb. 3-4).

Seit einiger Zeit wird deshalb diskutiert, wie etablierte Blockchains von einem PoW Algorithmus im laufenden Betrieb auf ein PoS-Verfahren umgestellt werden könnten. Das Ziel ist die Effizienz zu steigern und somit den Stromverbrauch zu verringern und die Umweltfreundlichkeit sowie die Skalierbarkeit zu verbessern. Eine solche Umstellung wird auch *"hard fork"* genannt, also eine harte Gabelung in der Blockchain aufgrund der veränderten Methode der Validierung (Kostal et al., 2018).

Das prominenteste Beispiel für ein solches Unterfangen ist die Ethereum Blockchain, die nach Bitcoin die zweitgrößte Marktkapitalisierung aufweist (Abb. 3-4). Um diesen Übergang vollziehen zu können, wurde für die ETH-Blockchain das Casper the Friendly Finality Gadget (Casper FFG) entwickelt. Der Vorteil dieser Übergangslösung ist, dass die Kryptowährung für die Entwicklungszeit nicht vom Markt genommen werden muss, jedoch verlängert sich so die Übergangszeit (Buterin et al., 2020). Es ist damit unklar, wann diese Umstellung vollzogen sein wird. Auch fehlen Informationen zu den dadurch realisierbaren, tatsächlichen Effizienzgewinnen und Minderungen der Umweltbelastungen.

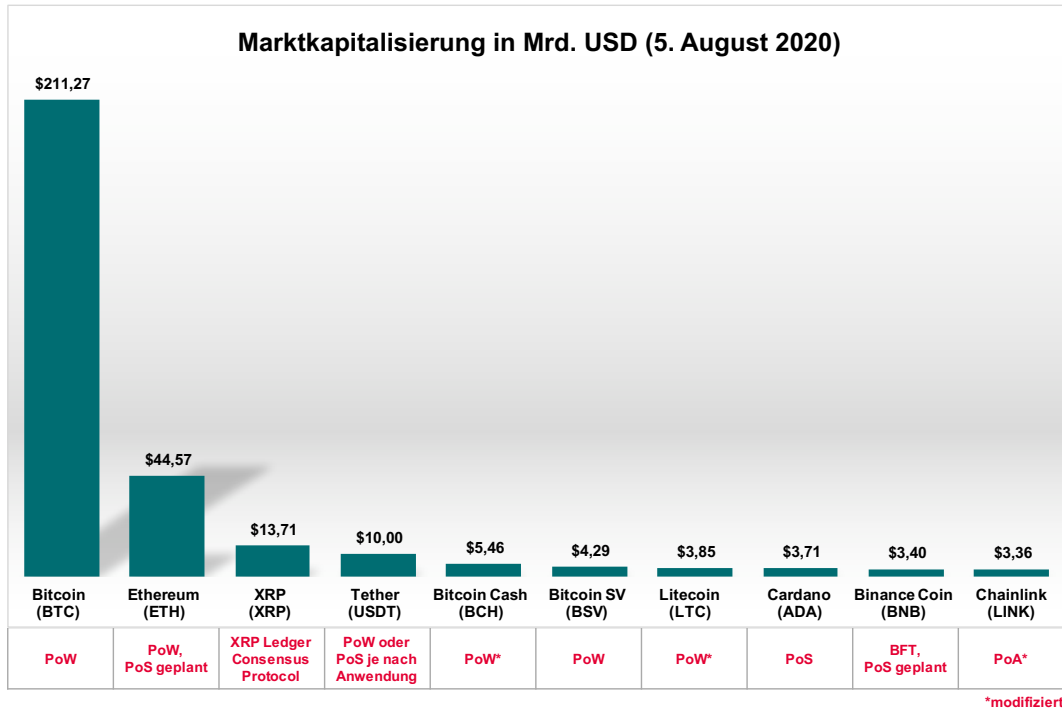


Abb. 3-4 Marktkapitalisierung und Konsensmechanismen der zehn größten Kryptowährungen (eigene Grafik mit Daten von CoinMarketCap, 2020)

Für das Bitcoin-Netzwerk sind vergleichbare Überlegungen nicht bekannt. Ein Fokus liegt hier auf der Steigerung der Leistungsfähigkeit und Skalierbarkeit der Transaktionsgeschwindigkeit. Aktuell wird versucht, durch die Einführung eines zweiten Protokoll-Layers, dem sogenannten Lightning-Netzwerk, Transaktionen zu bündeln und damit sowohl schneller als auch ressourcenleichter zu machen. Im Ergebnis würde dies jedoch lediglich die Anzahl von Transaktionen erhöhen, nicht aber den weiteren Anstieg des Energiebedarfs für das Mining dämpfen oder gar verhindern (de Vries, 2019a).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Umstellung von Netzwerken auf ein anderes Konsensverfahren theoretisch möglich ist. Der Praxisbeweis im großen Maßstab durch Ethereum steht allerdings noch aus.

Für neue Blockchain-Anwendungen bietet sich daher an, von vorneherein über PoS-Varianten bzw. alternative, energieeffizientere Verfahren einzusteigen.

4 Konzeption einer Nachhaltigkeitsbewertung von Blockchain-Lösungen

In Kapitel 3 wurden erste Ergebnisse und Abschätzungen zu Umweltwirkungen und Energieverbrauch von Blockchain-Anwendungen aus der Literatur zusammengestellt. Insbesondere mit Bezug zum Bitcoin-Netzwerk liegen einige quantitative Abschätzungen vor, die alle auf signifikante, in der Tendenz steigende Stromverbräuche hinweisen und damit den Handlungsbedarf für eine ökologische Gestaltung von Blockchain-Anwendungen unterstreichen.

Es wird dabei deutlich, welche Probleme noch für eine systematische und methodisch belastbare Evaluierung bestehen:

- Die **Datenverfügbarkeit** zur Quantifizierung der tatsächlichen Nutzung von Dateninfrastrukturen und Rechenkapazitäten ist eingeschränkt, weshalb Energieverbräuche in der Regel über Annahmen und Kenngrößen abgeschätzt bzw. abgeleitet werden. Vergleichbar mit anderen cloud-basierten Diensten fehlt auch bei Blockchain-Anwendungen eine systematische Datenerfassung und Messung der Aufwendungen des realen Betriebs.
- Für einen Vergleich von Anwendungen und technischen Lösungen fehlen noch allgemein **vergleichbare Indikatoren** als Bezugsgröße.⁵ Ansatzpunkte wären eine Erfassung des Energiebedarfs „pro Transaktion“ bzw. innerhalb der Validierungsmethode „Proof of Work“ (PoW) auch die Hash-Rate in MH/s (Megahash pro Sekunde). Die Funktion bzw. die Transaktionen der Blockchains unterscheiden sich jedoch je nach Anwendungsfall und sind deshalb häufig nicht direkt miteinander zu vergleichen.
- Grundsätzlich stellt sich damit auch die Frage des **Bezugsrahmens bzw. der Systemabgrenzung**. Wie oben (Kap. 2) angesprochen, stehen Blockchain-Lösungen nicht für sich alleine, sondern erfüllen definierte Aufgaben in einem übergeordneten (digitalen) Ökosystem. Für eine ganzheitliche Bilanzierung muss daher vorab geklärt werden, was zur "Blockchain" gehört und damit miteinander verglichen und bewertet werden soll (vgl. auch Kap. 5.3).

Als Zwischenfazit ist festzuhalten, dass zurzeit sowohl die Datengrundlagen als auch der methodische Rahmen für eine Quantifizierung und umfassend-vergleichende Bewertung fehlen. Ungeachtet dessen zeichnen sich jedoch Trends und Entwicklungen ab, die Richtungsaussagen zulassen.

Die Aufgabe dieser Kurzstudie ist daher, im Sinne einer Heuristik geeignete Entscheidungsgrößen und Leitplanken für Plausibilitätsprüfungen und Risikobewertungen in der Praxis zu definieren.

⁵ Das Portal *Digiconomist* nutzt i.d.R. „pro Transaktion“ schränkt aber ein: *“There’s probably not one satisfying measure, yet, what’s clear to everyone is that a disproportionate amount of resources is being used.”* (de Vries, 2019b)

4.1 Anforderungen an die nachhaltige Gestaltung von Blockchain-Lösungen

Eine ökologisch nachhaltige Gestaltung von Blockchain-Lösungen muss erstens den Energieverbrauch des Betriebs der Blockchain und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen minimieren. Zweitens muss der Ressourceneinsatz bei der Herstellung der eingesetzten Hardware reduziert und die eingesetzten Rohstoffe möglichst lange und effizient genutzt werden. Die wesentlichen Einflussgrößen dafür sind:

■ **Energiebedarf und Treibhausgasemissionen im Betrieb der Blockchain – Rechenaufwand als Designprinzip des Konsensmechanismus vermeiden:**

Die Synopse der bisherigen Erkenntnisse zu Energieverbräuchen von unterschiedlichen Konsensverfahren unterstreicht, dass rechenintensive Proof-of-Work-Verfahren wo immer möglich zu vermeiden und durch recheneffizientere Alternativen zu ersetzen sind. Die adäquate Wahl des Blockchain-Designs im Kontext der Anforderungen des jeweiligen Use Cases ist hier der Schlüssel.

Die konsequente Ausrichtung von Konsensverfahren auf Energieeffizienz steht dabei nicht im Widerspruch zur langfristigen Perspektive der Versorgung von digitalen Infrastrukturen und Rechenzentren mit CO₂-freiem Strom aus erneuerbaren Energien. Da der Ausbau der regenerativen Stromerzeugung nicht beliebig beschleunigt und skaliert werden kann und gleichzeitig neue Verbrauchssektoren durch Verkehr, Wärme und Teile der Industrie hinzukommen, bleibt Energieeffizienz auf absehbare Zeit eine (umwelt-)kritische Erfolgsvoraussetzung für alle digitalen Lösungen.

■ **Umfang der in der Blockchain gespeicherten Daten und Anforderungen an die Datenintensität von Transaktionen – die Blockchain datenschlank gestalten:**

Jede Form von Datenspeicherung und Datenkommunikation benötigt Energie und Hardwarekapazitäten. Das Datenmanagement ist damit im Grundsatz möglichst effizient und sparsam zu gestalten. Für Blockchain-Anwendungen ist dies relevant, weil im Lebenszyklus einer Blockchain das Datenvolumen zunächst mit jedem neuen Block anwächst. Da es keine offiziellen Zahlen gibt, bereiten verschiedene Websites Annäherungen auf, die automatisch aktualisiert werden. Im September 2020 lag Schätzungen zufolge die Gesamtgröße der Bitcoin-Blockchain zwischen rund 300 und 350 GB und die der Ethereum-Blockchain zwischen rund 165 und 433 GB (BitInfoCharts, 2020; Blockchain, 2020). Diese Daten müssen im Prinzip immer wieder auf allen Rechnerknoten des Netzwerks gespeichert und permanent aktualisiert werden.

Durch verschiedene Ansätze kann das zu speichernde Datenvolumen reduziert werden (z.B. Unterscheidung von light und heavy nodes, pruning und off-chain storage), was allerdings u.U. Implikationen für die Sicherheit und die Transparenz für alle Nutzenden mit sich zieht und in den Konsequenzen abgewogen werden muss.

■ **Ressourcenverbrauch der Hardware reduzieren – Ausrüstung und Infrastrukturen möglichst lange nutzen**

Die umweltgerechte Gestaltung von IKT Technologien und Infrastrukturen ist eine zentrale Herausforderung für die Herstellungs- und Dienstleistungsunternehmen der Digitalwirtschaft. Design und Herstellung von Endgeräten, Rechenzentren und Netzwerkausrüstung müssen viel stärker als bisher an der Vermeidung des Einsatzes von kritischen Rohstoffe mit sozial-ökologisch bedenklichen Lieferketten, an Langlebigkeit sowie an der Kreislaufführung der Rohstoffe ausgerichtet sein (*Circularity by Design*).

Für Blockchain-Anwendungen erscheint es plausibel, dass der Ressourcenimpact am geringsten ist, wenn übliche Rechenkapazitäten, Netzwerke und Infrastrukturen mitgenutzt werden, die ohnehin schon im Einsatz für sonstige Anwendungen sind und im Idealfall keine zusätzliche Hardwareinvestition erforderlich ist. Gleichzeitig ist zu erwarten, dass für diese Hardware in Zukunft Verbesserungen aufgrund von GreenIT-Strategien bzw. optimiertem Elektroschrottreycling realisiert werden.

Im Gegensatz dazu ergeben sich wie in Kapitel 0 angesprochen bei spezifischen PoW-Verfahren – insbesondere beim Bitcoin – besondere Anforderungen an die Rechnerleistung und Performance von Mining-Farmen. Dies setzt ökonomische Anreize zur Nutzung spezifischer Hardware und zur kontinuierlichen technologischen Leistungssteigerung. Die Konsequenz sind schnelle Austauschraten bei kurzen Lebenszyklen und es kann mit entsprechend hohem Anfall von obsoletter Hardware als Elektroschrott gerechnet werden, dessen Entsorgung je nach Region der Mining-Farmen unklar ist.

4.2 **Der Ansatz – Perspektive einer problemgerechten Technologiewahl**

Die bisherigen Überlegungen haben deutlich gemacht, welche Bedeutung die Wahl der spezifischen Blockchain-Technologie und insbesondere des zugrundeliegenden Konsensverfahrens für die ökologischen Auswirkungen einer Lösung hat.

Um diese Wahl zu unterstützen, bietet es sich an, bei der Entwicklung von Leitplänen für eine nachhaltige Gestaltung von Blockchain-Projekten hier anzusetzen, die Perspektive einer problemgerechten Technologiewahl einzunehmen und vom Anwendungsfall her zu denken. Die grundlegende Frage ist damit:

Welche Aufgabe soll gelöst werden, welche Anforderungen stellt der Use Case an die Auswahl und Gestaltung der Blockchain- bzw. DLT-Lösung?

Und: erfordert das Problem damit (überhaupt) eine Lösung mit Blockchain- oder Distributed-Ledger-Technologien?

Zentrale Attribute zur Charakterisierung von Blockchain-Lösungen

In Kapitel 2.3 wurde die grundsätzliche Funktion der Blockchain bei der Organisation von Transaktion zwischen mehreren Beteiligten skizziert. Blockchains und DLT-Technologien kommen vor allem dann ins Spiel, wenn dieses Setup die Kooperation von Anspruchsgruppen erfordert, die unterschiedliche Interessen aufweisen und im Wettbewerb zu einander stehen können (*Coopetition Dilemma*). Für die konkrete Ausgestaltung solcher Multi-Stakeholder-Lösungen wurde die in Kapitel 3.2 skizzierte Vielzahl von Blockchain-Lösungen mit unterschiedlichen Merkmalen entwickelt.

Allen gemeinsam ist, dass sie drei, teilweise widersprüchliche Anforderungen berücksichtigen und in Einklang bringen müssen. Diese zentralen Attribute – Dezentralität, (transaktionale) Effizienz und Sicherheit – können zur Charakterisierung von Blockchain-Lösungen herangezogen werden (vgl. Kapitel 5.1).

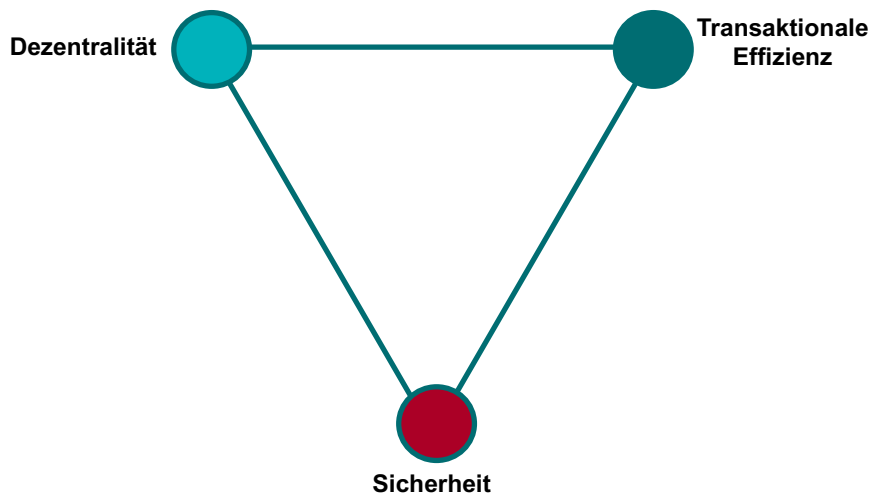


Abb. 4-1 Die drei zentralen Attribute zur Charakterisierung von Blockchain-Lösungen

Dezentralität

Das Kriterium der Dezentralität steht in besonderem Maße für die ursprüngliche Philosophie der Blockchain, ein hierarchiefreies Netzwerk zu schaffen, dessen Knoten gegenseitig und miteinander die Governance und Validierung der Transaktionen sicherstellen.⁶ Intermediäre sowie zentrale Instanzen sollen dadurch explizit vermieden werden. Diese Reinform ist z.B. im Ansatz des Bitcoins mit dem zugrundeliegenden PoW-Verfahren angelegt worden. Zu berücksichtigen ist dabei:

- In der Praxis kann sich auch in PoW-Ansätzen wie beim Bitcoin durch die Konzentration der Mining-Kapazitäten in der Hand weniger leistungsstarker Teilnehmer eine Konzentration herausbilden.

⁶ Im Sinne eines Life-Cycles der Softwaregovernance zeichnen sich Blockchain-Lösungen durch die Dezentralität in der Betriebsphase (Operations) aus. Die Entwicklung in der Designphase wie auch das End-of-Life Management in der Terminationsphase sind in der Regel weiterhin durch die initiiierende, entwickelnde Instanz gesteuert und damit zentral organisiert.

- Andere Blockchain- und DLT-Lösungen weichen durch Differenzierung der Rechte schon im Konzept von diesem Prinzip ab (z.B. DPoS, DPoA oder Ripple), in der Regel um Vorteile der Effizienz und Skalierbarkeit zu realisieren (s.u.).

Aus Sicht des Kriteriums der Dezentralität ist damit die entscheidende Frage, ob die Mitglieder des Netzwerkes aus Prinzip oder aufgrund von Kostenvorteilen auf die Einbindung von zentralen Instanzen explizit verzichten wollen – oder quasi gezwungenermaßen eine dezentrale Lösung organisieren müssen, da keine geeignete vertrauenswürdige Instanz zur Verfügung steht (z.B. im Fall korruptionsanfälliger staatlicher Institutionen).

Eine weitere Frage im Kontext der Dezentralität ist, ob und inwieweit ein dezentrales Netzwerk öffentlich zugänglich ist und die gespeicherten Informationen auch frei einsehbar sind. Dies kann im Konflikt zu Datenschutzinteressen und regulatorischen Anforderungen stehen.

Transaktionale Effizienz

Die transaktionale Effizienz ist hier definiert als die "operative Leistungsfähigkeit" und Skalierbarkeit der Blockchain-Lösung. Die wichtigsten Kriterien hierfür sind der Rechenaufwand des Validierungsverfahrens und dessen Auswirkungen auf die Transaktionsgeschwindigkeit, das maximale Transaktionsvolumen und letztlich auch die Transaktionskosten.

Eine Kenngröße für Skalierbarkeit ist die Rate, mit der eine bestimmte Blockkette Transaktionen abwickelt. Als eine sinnvolle Messgröße bietet sich der maximale Durchsatz an – gemessen in Transaktionen pro Sekunde.⁷ Im Vergleich der Alternativen ist erkennbar, dass alle bisherigen Konsensmechanismen noch nicht im Bereich schneller Datenkommunikationssysteme operieren (siehe Tab. 4-1).

Auch ist der Vergleich mit klassischen Ansätzen wie Datenbanken weiterhin relevant. Ein Experiment der Deutschen Börse im Jahr 2016 ergab, dass die Blockchain-Lösungen nicht in jeder Hinsicht besser liefen. Der Prozess dauerte etwas länger als bei der Verwendung klassischer Software und verursachte relativ hohe Rechenkosten (Look, 2019). Selbst die DPoS-Blockchain EOS mit rund 100 Transaktionen pro Sekunde als schnellste angewandte Blockchain ist dem VISA-System unterlegen. Die Transaktionsrate von EOS ist mehr als zehnmal höher als die Rate von Bitcoin, aber immer noch mehr als zehnmal langsamer als die Transaktionsrate von VISA. Diese Ergebnisse machen deutlich, dass die Blockchains seit Bitcoin in Bezug auf den Umfang erhebliche Fortschritte gemacht haben, aber selbst die schnellsten Blockchains den traditionellen Systemen immer noch um eine Größenordnung hinterherhinken (Irresberger et al., 2020).

⁷ Zu beachten ist, dass es sich nicht um das Produkt aus der Blockrate und der Anzahl der Transaktionen pro Block handelt, da der Konsensprozess einer Blockchain möglicherweise nicht in der Lage ist, diese theoretische Transaktionsrate aufrechtzuerhalten (Irresberger et al., 2020)

Protokoll	Anzahl der Blockchains	Median	Mittel	Minimum	Maximum	Standardabweichung
PoW	13	1.2	8.0	0.1	51.2	14.9
PoS	2	1.0	1.0	0.1	1.9	1.3
DPoS	4	24.8	37.6	0.1	100.6	48.0
Hybrid	2	17.5	17.5	0.1	35.0	24.7
Non-Standard	4	1.0	5.3	0.5	18.7	9.0

Tab. 4-1 Zusammenfassende Statistiken der maximalen Transaktionen pro Sekunde (TPS) für verschiedene öffentliche Blockchains (Irresberger et al. 2020)

Verschiedene Ansätze versuchen, die Performance von Blockchain-Netzwerken weiter zu steigern, z.B. durch Fragmentierung in Teilnetze (*sharding*) oder die Zulassung von Side Chains. In beiden Fällen wird nicht das gesamte Datenvolumen der Blockchain durch den Validierungsprozess gezogen, was zu erheblichen Beschleunigungen führt. Gleichzeitig steigt aber auch die potenzielle Verwundbarkeit durch Angriffe, da die kritische Masse zur Dominanz des Teilnetzwerks bzw. der Side Chain geringer ist.

Die Wahl des Blockchain-Ansatzes hat somit erheblichen Einfluss auf die transaktionale Effizienz, was sich auch im schon diskutierten Energieverbrauch niederschlägt. Gerade in Anwendungsfällen, in denen es nicht um maximale Dezentralität und öffentlichen Zugang, sondern um schnelle Transaktionen und hohe Durchsätze innerhalb eines beschränkten Netzwerks von (bekannten) Beteiligten geht, bieten sich Verfahren an, die (energie-)aufwändige Rechenleistung zur Validierung vermeiden.

Grundsätzlich ist jedoch zu hinterfragen, welche Geschwindigkeit in dem konkreten Use Case überhaupt gefordert ist – nicht jede Anwendung braucht Transaktionen in quasi "Echtzeit". Ein Zeitverzug von wenigen Minuten ist u.U. völlig akzeptabel, um etwa Ausbildungsdokumente mit einem Zeitstempel zu versehen.

Sicherheit

Das Kriterium der Sicherheit bezieht sich letztlich auf die Integrität der Daten und Dokumentation der Transaktionen in einer Blockchain oder DLT-Anwendung. Das betrifft die Absicherung gegen den Verlust von Daten im Sinne vieler dezentraler Sicherungskopien. Wichtiger ist jedoch der Schutz gegen (nachträgliche) Manipulation der Transaktionsdaten. Sicherheit in der Blockchain bezieht sich damit also vor allem auf die Integrität und Unveränderlichkeit von Daten, d.h. auf dem Schutz vor Manipulation, dem Risiko der Rückabwicklung oder Veränderung einer Transaktion.

Auch hier unterscheiden sich die Technologieansätze. Die Sicherheit der PoW-Blockchain hängt z.B. letztlich vom unverhältnismäßig hohen Gesamtenergieaufwand für die Manipulation des Netzwerkes ab. Die Sicherheit der PoS-Blockchain hängt dagegen vom Marktkapital des nativen PoS-Kryptowerts ab. Irresberger et al. (2020)

konstruieren eine Metrik, die Sicherheitsvergleiche über Blockchains mit verschiedenen Konsensprotokollen ermöglicht. Beispielhafte Ergebnisse sind:

- Weder Energieausgaben noch Marktkapital wirken als Stellvertreter für Blockchain-Sicherheit im Allgemeinen, sondern jeweils nur für PoW- und PoS-Blockchains;
- Bitcoin (PoW) ist sicherer als EOS, Ethereum und TRON, aber Ripple (Non-Standard) ist sicherer als Bitcoin;
- Die DPoS-Blockchains EOS und TRON sind weniger sicher als Bitcoin (PoW), aber sicherer als Ethereum (PoW), obwohl Ethereum mehr Energie verbraucht als jede andere Blockchain außer Bitcoin.

Offensichtlich ist damit keine allgemeingültige Aussage zur "besten weil sichersten" Technologie ableitbar. Die Bewertung und Definition des erforderlichen Schutzniveaus müssen damit auf den konkreten Use Case und die zu erwartenden Risiken abgestimmt werden. In vielen Fällen, in denen es um Micropayments oder Transaktionen ohne großen monetären Wert geht, kann eher auf weniger (energie-)aufwändige Schutzkonzepte zurückgegriffen werden als bei Use Cases mit hohen Risiken oder Mitgliedern mit besonderem Schutzbedürfnis. Ein wichtiger Ansatzpunkt ist dabei die Prüfung, ob der Anwendungsfall als public blockchain einer breiten Gruppe offenstehen soll oder die Sicherheit u.a. durch die Kontrolle des Zugangs in einem privaten Netzwerk gewährleistet wird.

4.3 Zwischenfazit zur Technologiewahl

Die kurze Diskussion der drei wesentlichen Kriterien Dezentralität, (transaktionale) Effizienz und Sicherheit hat verdeutlicht, dass sich die verschiedenen Blockchain-Ansätze und die ihnen zugrundeliegenden Konsensverfahren durch spezifische Stärken und Schwächen auszeichnen. Keine der Technologien kann als allgemeingültig beste Lösung gelten – ebenso sind die drei Kriterien nicht gleichermaßen gut zu erfüllen. In der Literatur wird dabei auch von dem Blockchain-Trilemma gesprochen. Ein Beispiel für eine derartige vergleichende Bewertung sind die Arbeiten von Irresberger et al. (2020), die eine Reihe von Blockchain-Technologien anhand spezifischer Metriken für die Kriterien Dezentralität, Skalierbarkeit und Sicherheit bewertet und gerankt haben (s. Tab. 4-2, vgl. auch Tab. 7-1 im Anhang).

Für die in dieser Studie adressierte Aufgabe einer Projektbewertung in der Praxis ergeben sich aus den bisherigen Überlegungen zwei Schlussfolgerungen:

- Für die Realisierung von Blockchain-Anwendungen bieten sich viele unterschiedliche Optionen – die aus dem Beispiel Bitcoin bekannte *public blockchain* auf Basis PoW-Konsensverfahren ist nur eine unter vielen Alternativen;
- Die Technologiewahl wird durch die spezifischen Merkmale des Anwendungsfalls bestimmt – diese definieren die Prioritäten mit Blick auf drei zentrale Kriterien und den daraus resultierenden Detailanforderungen an eine Blockchain-Lösung.

Durch schrittweises Abprüfen von Prioritäten und Merkmalen lässt sich damit ein Anwendungsfall spezifizieren und die möglichen Technologiealternativen eingrenzen.

Im folgenden Kapitel 5 wird hierzu ein Vorschlag gemacht.

Sub-Cluster	Blockchain	Ranking von 1 (am besten) bis 25 (am schlechtesten)		
		Dezentralität	Skalierbarkeit	Sicherheit
PoW (alt)	BTC	1	8	3
	LTC	3	9	5,5
	DOGE	7	10	7,5
PoW (neu)	ETH	2	7	19
	BCH	6	5	10
	BSV	4	2	17
Skalierbarer PoS	DASH	10	4	7,5
	EOS	8	1	13
	TRX	9	3	15
Non-Standard	XRP	14	6	1

Anmerkung: Die fett gedruckten Zahlen sind der jeweils beste Wert jeder Blockchain

Tab. 4-2 Ranking von Public Blockchains (Irresberger et al., 2020, S. 29)

Zugrundeliegende Definitionen:

Dezentralität: Breite der Basis an Nutzenden der Blockchain als wichtigste Triebkraft für den wirtschaftlichen Wert⁸

Skalierbarkeit: Fähigkeit der Nutzenden, zeitnah Dienstleistungen zu erhalten als wirtschaftlicher Schlüsselfaktor für die Nutzung von Blockchains

Sicherheit: Fähigkeit der Nutzenden, die sichere Abwicklung ihrer Zahlungen zu gewährleisten, als wichtigstes wirtschaftliches Anliegen

⁸ Die Dezentralisierungsmetrik nach (Irresberger et al., 2020) berücksichtigt die Größe der Basis an Nutzenden jeder Blockchain anstatt der Dezentralisierung des Validierungsprozesses wie von Alsabah und Capponi (2020), Irresberger (2018) und Rosu und Saleh (2020) untersucht. Der Grund dafür ist, dass der Begriff der Dezentralisierung des Validierungsprozesses eng mit der Blockchain-Sicherheit zusammenhängt, die durch die Sicherheitsmetrik erfasst wird.

5 Vorschlag zu Kriterien und Verfahrenskonzept für die Nachhaltigkeitsbewertung

Es ist das Ziel der Blockchain-Strategie der Bundesregierung, Klimaschutz, Energieeffizienz und Nachhaltigkeitsaspekte als wichtige Kriterien in die Entscheidung zu staatlich geförderten oder initiierten Blockchain-Projekten einzubeziehen. Dafür soll eine *"einfache, flexible und transparente Bewertungsmethodik"* erarbeitet werden.

Auf Grundlage der bisherigen Betrachtungen wird hierzu ein Vorschlag gemacht. Es wird dabei die Perspektive einer Projektbewertung eingenommen, d.h. die Annahme ist, dass eine Idee oder Projektbeschreibung für eine Blockchain-Anwendung (ein Projekt) vorliegt und mit Blick auf Nachhaltigkeitsaspekte bewertet werden soll.

Die Datengrundlagen und Methoden für eine konsistente und allgemein vergleichbare quantitative Bewertung von Kenngrößen fehlen allerdings derzeit (noch). Hier besteht weiterer Forschungsbedarf insbesondere zur quantitativen Evaluierung von konkreten Fallbeispielen aus der Praxis, um bessere Vergleichsgrößen und Referenzwerte für die Abschätzung von typischen Anwendungsfällen zu erhalten.

Der hier vorgeschlagene Ansatz baut daher auf der Idee einer **gestuften, qualitativen Plausibilitätsprüfung** auf, in der Leitplanken und relevante Richtungsentscheidungen abgeprüft werden. Hierdurch sollen potenzielle Risiken für die Klima-, Energie- und Umweltwirkungen vermieden werden und die Wahrscheinlichkeit für tendenziell positive Designentscheidungen erhöht werden. Die im Folgenden skizzierten Bausteine sollen die Grundidee und mögliche Ausprägungen darstellen. Für die praktische Nutzung in Projektbewertungen wäre dann eine weitere analytische Schärfung sowie eine redaktionelle Überarbeitung z.B. in Form von grafisch aufbereiteten Leitfäden oder Checklisten erforderlich.

1. Charakterisierung der Kernanforderungen

der Blockchain-Anwendung als Grundlage für die Technologieauswahl

Prüfung, welcher Typ von Blockchain-Technologie und Konsensverfahren für die vorliegende Problemstellung geeignet ist, mit dem Ziel, energieaufwändige PoW-Verfahren weitestgehend auszuschließen.

2. Berücksichtigung von Kriterien

für umweltgerechte Digitalisierung im Projektdesign

Prüfung, ob wesentliche generelle Einflussgrößen für energie- und ressourceneffiziente digitale Lösungen, wie z.B. energieeffizienten Rechenzentren, genutzt werden.

3. Bewertung des Nutzens

der Blockchain-Anwendung im Projekt

Abschätzung des erwarteten Nutzens der angestrebten Lösung als Voraussetzung der ganzheitlichen Abwägung von Aufwand und Nutzen des Projekts.

4. Konsistenzcheck der Integration

der Blockchain-Technologie in die Implementierungsumgebung

Ergänzende Prüfung der Integration der Blockchain-Technologien in das übergeordnete digitale Ökosystem der Lösung mit dem Ziel, eine konsistente Performance von (externen) Dateninputs, Datenverarbeitung in der Blockchain sowie Nutzung von Daten und Ergebnissen in nachfolgenden Prozessen sicherzustellen.

Abb. 5-1 Vier Schritte einer gestuften, qualitativen Plausibilitätsprüfung

Es wird nochmals darauf hingewiesen, dass sich der Vorschlag zur Projektbewertung ausschließlich auf Nachhaltigkeitskriterien bezieht. Eine grundsätzliche Bewertung der Sinnhaftigkeit der Anwendung oder der Bedeutung des adressierten Problems findet nicht statt. Ebenso geht es nicht um die administrative Projektevaluation, d.h. Begutachtung der Qualität des Projektplans, der Plausibilität der Kostenplanung etc.

5.1 Charakterisierung der Kernanforderungen der Blockchain-Anwendung als Grundlage für die Technologieauswahl

Die spezifischen Anforderungen des Use Case entscheiden darüber, wie gut eine bestimmte Blockchain-Technologie zur Lösung des Problems geeignet ist. Die Etablierung einer öffentlich verfügbaren Kryptowährung erfordert dabei andere Leistungsmerkmale als der Aufbau einer Dokumentation von Transaktionen zwischen einer begrenzten und miteinander bekannten Zahl von Unternehmen einer industriellen Lieferkette. Bei der Auswahl eines geeigneten Blockchain-Typs und damit eines Konsensmechanismus ergeben sich eine Reihe von Entscheidungspunkten, an denen die in Kapitel 4 diskutierten Attribute Dezentralität, (transaktionale) Effizienz und Sicherheit gewichtet und gegeneinander abgewogen werden sollen.

Für diese Aufgabe wird hier auf das Instrument eines Entscheidungsbaums zurückgegriffen, wie er in der Literatur in unterschiedlichen Ausprägungen diskutiert wird – meist mit der Leitfrage, ob eine Blockchain für die Lösung des Problems gebraucht wird.⁹ Im Rahmen dieser Studie wird das Instrument eingesetzt, um ein zweistufiges Ausschlussverfahren zu ermöglichen (Abb. 5-2):

- **In welchen Fällen ist eine private Blockchain-Lösung bzw. auch eine alternative Datenbanklösung für das Problem geeignet:** Hier kann und sollte ein PoW-Konsensverfahren vermieden werden. Der Energiebedarf der alternativen Validierungsmechanismen liegt meist in der Größenordnung von anderen digitalen Datenbanklösungen. Der ökologische Handlungsbedarf liegt in diesem Fall auf den generellen Strategien zur Senkung von Energie- und Umweltverbrauch (z.B. von Cloud-Dienstleistungen und Rechenzentren etc., vgl. Kap. 5.2).
- **Wenn eine Public Blockchain erforderlich ist, sollte ein PoW Verfahren vermieden und stattdessen soweit möglich ein PoS-Verfahren oder alternative Varianten eingesetzt werden.** Ein Projektvorschlag auf der Basis von PoW muss deshalb besonders plausible und begründete Argumente für die Anwendung von PoW-Verfahren vorbringen. Dazu gehören eine fundierte Darstellung der Aufwand-Nutzen-Relation und spezifischen Vorteile der Lösung, die den Energieaufwand rechtfertigen. Sollten neue technologische Entwicklungen die Leistungsmerkmale eines PoW-Verfahrens mit signifikant geringeren Energieverbrauch realisieren, ist dies besonders nachzuweisen.

⁹ Die hier verwendete Darstellung ist eine Modifikation des Ansatzes von (Beck et al., 2019), weitere Beispiele sind Chowdhury et al. (2018); CompTIA & Blockchain Advisory Council (2019); Höfelmann & Sandner, 2019); Osterland & Rose (2018); Wust & Gervais (2018)

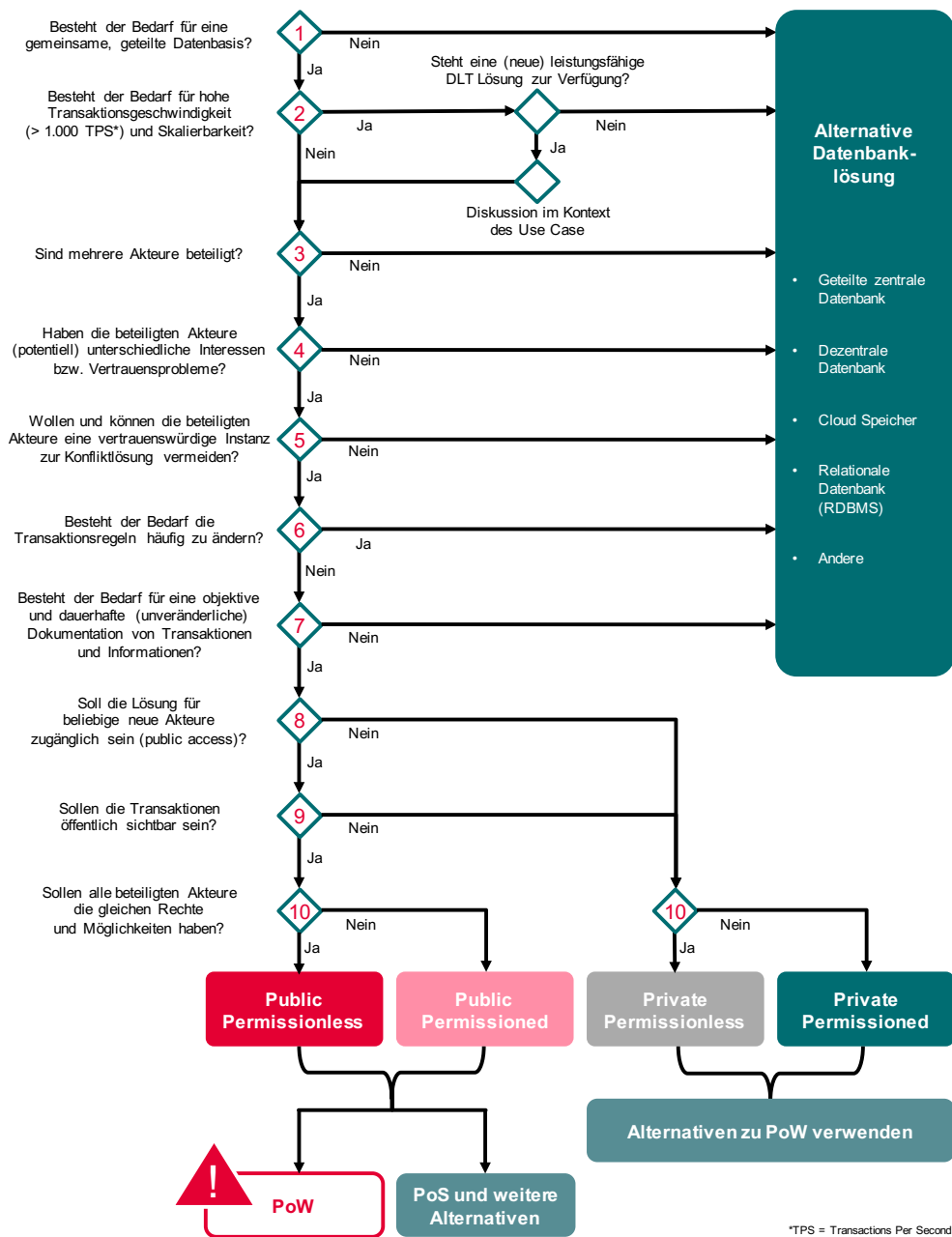


Abb. 5-2 Entscheidungsbaum zur Evaluierung von Blockchain-Lösungen (eigene Darstellung nach Beck et al., 2019)

Der Fokus der Argumentation zu den PoW-Verfahren sollte auf der Höhe und perspektivischen Entwicklung der spezifischen Energieaufwendungen für den Betrieb der Blockchain liegen. "Junge" Blockchains mit PoW-Verfahren können in der frühen Entwicklungsphase noch vergleichsweise niedrige Energieverbräuche aufweisen und dabei u.U. sogar zeitweilig besser als große PoS-Netzwerke abschneiden. Durch den progressiven Charakter des Validierungsaufwands wird dieser im Erfolgsfall jedoch stetig ansteigen. Ein Verfahrenswechsel zum späteren Zeitpunkt ist wie angesprochen keine realistische Option (vgl. Kapitel 3.2.4), so dass von Beginn an eine progressiv-dynamische Entwicklung des Energieverbrauchs ausgeschlossen werden sollte.

Das finale Ziel wäre, in späteren Versionen dieses Bewertungsverfahrens ein **Ranking der Energieverbräuche von Blockchain-Lösungen anhand von standardisierten Kenngrößen und Messverfahren** zu entwickeln und dann mit einer Klassifizierung von Use Cases zu verknüpfen.

Das könnte z.B. auch in Form eines **technologieoffenen, dynamischen Energieeffizienz-Benchmarks** realisiert werden, der den aktuellen Stand der Blockchain-Realisierungen repräsentiert und von neuen Projekten erreicht bzw. unterboten werden muss. Hier besteht jedoch noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

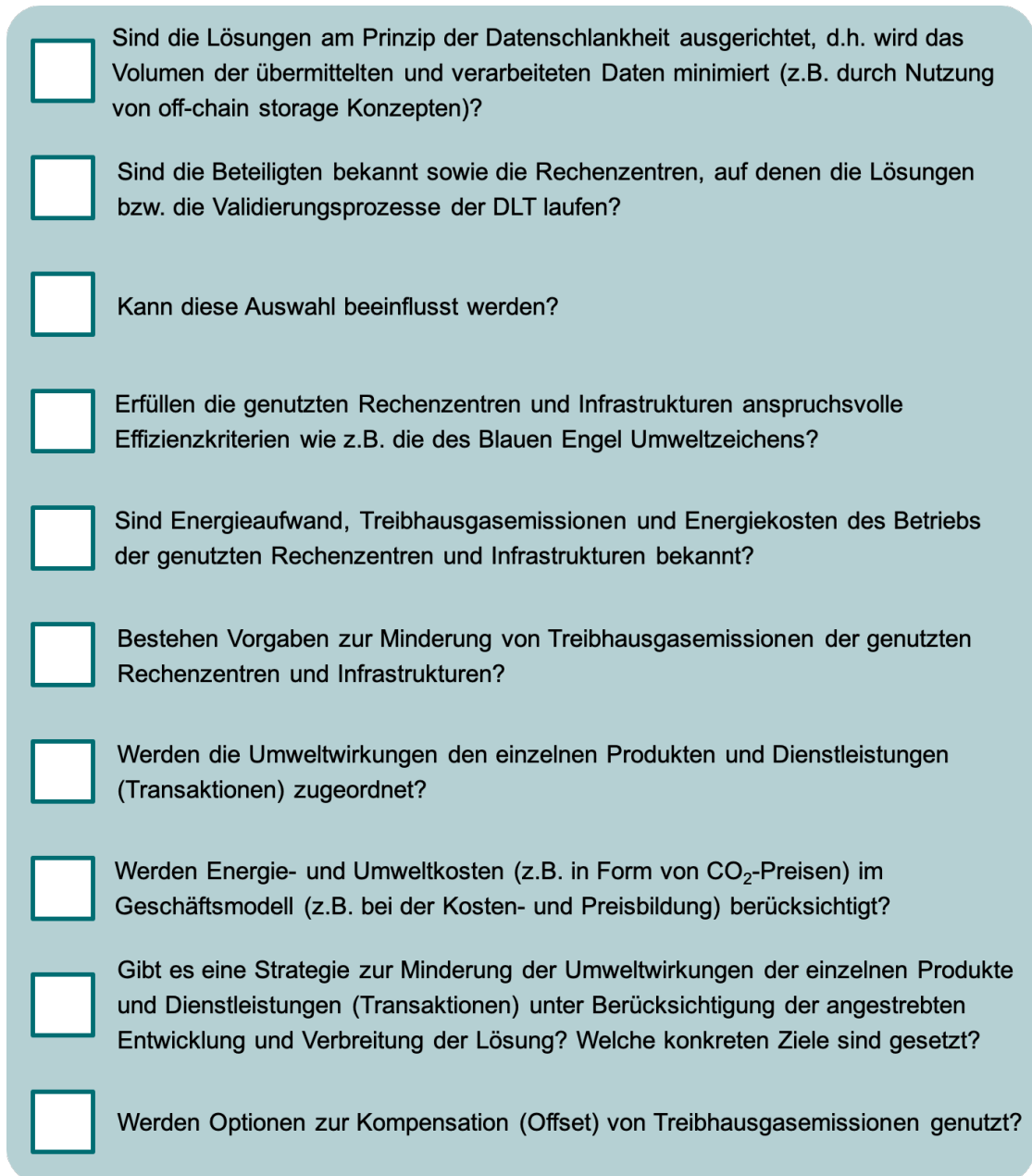
5.2 Berücksichtigung ökologischer Kriterien im Projektdesign

Die Charakterisierung im vorherigen Schritt ermöglichte eine indikative Aussage darüber, ob die im Projekt gewählte DLT-Lösung der Problemcharakteristik und dem Umsetzungskontext entspricht und welcher Typ von Blockchain-Konsensverfahren sich für eine Umsetzung anbietet. In der Ausdifferenzierung der Designoptionen in Abhängigkeit der Anforderungen wurde deutlich, dass für die meisten wesentlichen Anwendungsfälle DLT-Lösungen zur Verfügung stehen, die ohne die besonders ressourcen- und energieintensiven PoW-Konsensverfahren auskommen. Insbesondere im Fall von privaten Blockchains nähern sich die Konzepte durch spezifische Modifikationen, z.B. bzgl. der Governance und Verantwortlichkeiten, den Merkmalen von alternativen Datenbanklösungen an.

Unabhängig von der konkreten Auswahl einer Blockchain-Technologie ergibt sich somit zusätzlich die grundsätzliche Aufgabe, die gewählte **digitale Lösung als Ganzes möglichst umweltfreundlich zu konzipieren.**

Für die Projektbewertung sollten daher **Prüffragen** beantwortet werden können (s. Abb. 5-3), in denen das ökologische Verantwortungsbewusstsein der Antragstellenden und der Reifegrad der Umsetzung dokumentiert wird. Es ist das Ziel,

- durch die explizite und standardisierte Ansprache der Aspekte das Bewusstsein und Relevanz der Nachhaltigkeitskriterien für das Lösungsdesign zu schärfen und zu verstetigen,
- einen Nachfragedruck für relevante Informationen aufzubauen, der dann auch an Zulieferungs- und Dienstleistungsunternehmen weitergegeben werden soll, um dort entsprechende Sensibilisierung und Wirkungen zu erreichen,
- die Möglichkeit und Anreize zur Positionierung und Profilierung für fortgeschrittene Projekte zu geben,
- den Fördermittelgebenden durch die Rückläufe eine Übersicht zur Lage und möglichen Veränderungen im Zeitverlauf zu vermitteln, welche zu weiteren Politikmaßnahmen zur umweltgerechten Digitalisierung beitragen können,
- zusätzliche Informationen und Daten zu sammeln, die zur Konsolidierung der Datengrundlage beitragen können.



- Sind die Lösungen am Prinzip der Datenschlankheit ausgerichtet, d.h. wird das Volumen der übermittelten und verarbeiteten Daten minimiert (z.B. durch Nutzung von off-chain storage Konzepten)?
- Sind die Beteiligten bekannt sowie die Rechenzentren, auf denen die Lösungen bzw. die Validierungsprozesse der DLT laufen?
- Kann diese Auswahl beeinflusst werden?
- Erfüllen die genutzten Rechenzentren und Infrastrukturen anspruchsvolle Effizienzkriterien wie z.B. die des Blauen Engel Umweltzeichens?
- Sind Energieaufwand, Treibhausgasemissionen und Energiekosten des Betriebs der genutzten Rechenzentren und Infrastrukturen bekannt?
- Bestehen Vorgaben zur Minderung von Treibhausgasemissionen der genutzten Rechenzentren und Infrastrukturen?
- Werden die Umweltwirkungen den einzelnen Produkten und Dienstleistungen (Transaktionen) zugeordnet?
- Werden Energie- und Umweltkosten (z.B. in Form von CO₂-Preisen) im Geschäftsmodell (z.B. bei der Kosten- und Preisbildung) berücksichtigt?
- Gibt es eine Strategie zur Minderung der Umweltwirkungen der einzelnen Produkte und Dienstleistungen (Transaktionen) unter Berücksichtigung der angestrebten Entwicklung und Verbreitung der Lösung? Welche konkreten Ziele sind gesetzt?
- Werden Optionen zur Kompensation (Offset) von Treibhausgasemissionen genutzt?

Abb. 5-3 Exemplarische Prüffragen für die Berücksichtigung ökologischer Kriterien im Projektdesign von Blockchain-Lösungen

In der Auswertung kann durch die Gestaltung der Checkliste bzw. des Fragebogens die Möglichkeit zur qualitativen Begründung geschaffen werden, z.B. in der Form:

■ **wenn JA:** Was genau? Wie weit umgesetzt?

■ **wenn NEIN:** Warum nicht? Was ist geplant, um es zu ändern?

5.3 Bewertung des (spezifischen) Nutzens von Blockchain-Anwendungen

Die bisherigen Überlegungen haben sich auf Optionen zur Reduktion des Energie- und Ressourcenverbrauchs von Blockchain-Anwendungen konzentriert – es wird das Ziel verfolgt, eine Blockchain-Lösung mit möglichst wenig Umweltwirkung zu realisieren. Dieser Ansatz ist aus Sicht der Nachhaltigkeitsbewertung grundsätzlich richtig und eine robuste Strategie.

Unbeantwortet bleibt allerdings die Frage, ob der verbleibende Aufwand durch den zu erwartenden Nutzen gerechtfertigt ist. Was ist der besondere positive Beitrag der Blockchain in Abhängigkeit vom Anwendungsfall? Was wäre die alternative Lösung, welchen Aufwand würde diese verursachen?

Oder anders formuliert: Lohnt sich der Einsatz von Energie und Ressourcen mit Blick auf die angestrebten Ergebnisse der Blockchain-Lösung?

Für eine vollständige Nachhaltigkeitsbewertung muss diese Nutzenperspektive mit einbezogen werden. Letztlich ist damit eine ganzheitliche, abwägende und vergleichende Bewertung aller Effekte erforderlich.

So unmittelbar einleuchtend und relevant diese Forderung ist, so unbefriedigend ist jedoch der aktuelle Stand von Methoden und Instrumenten. Die ganzheitliche Bewertung von Projektnutzen und Vergleich von Aufwand und Nutzen unterschiedlicher Wirkungskategorien wird seit längerem intensiv diskutiert, wie im Kontext von Projekten der Wirtschaft (z.B. Balanced Score Card) oder der Entwicklungszusammenarbeit.

Im Rahmen dieser Kurzstudie konnten allerdings keine geeigneten Methoden, Tools oder Leitfäden identifiziert werden, die sich schlüssig in die vorliegenden Vorschläge zur Bewertung von Blockchain-Projekten integrieren ließen.¹⁰ Hierfür müsste die Recherche ausgeweitet und explizit auf das Thema der ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbewertung von Digitalprojekten ausgerichtet werden. Es zeichnet sich ab, dass hier weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

Als pragmatischer erster Schritt werden im Folgenden einige Leitfragen zur Nutzendimension skizziert. Durch die qualitative Darstellung und Diskussion dieser Aspekte, z.B. im Rahmen der Projektbeschreibung, kann dadurch die Zielrichtung und Erwartungshaltung des Projekts geschärft werden.

Bei der Beantwortung und Auswertung sollten Informationen vorgelegt werden zu:

- Welche Kriterien und Messgrößen kommen zum Einsatz?
- Was sind die erwarteten Ergebnisse (Schätzgrößen und Einflussfaktoren)?

¹⁰ Eher allgemeine Ansätze finden sich im Leitfaden der Bitkom (2019) und bei Klein et al. (2018)

1. Was ist die Grundausrichtung der Blockchain- und DLT-Lösung im Projekt?

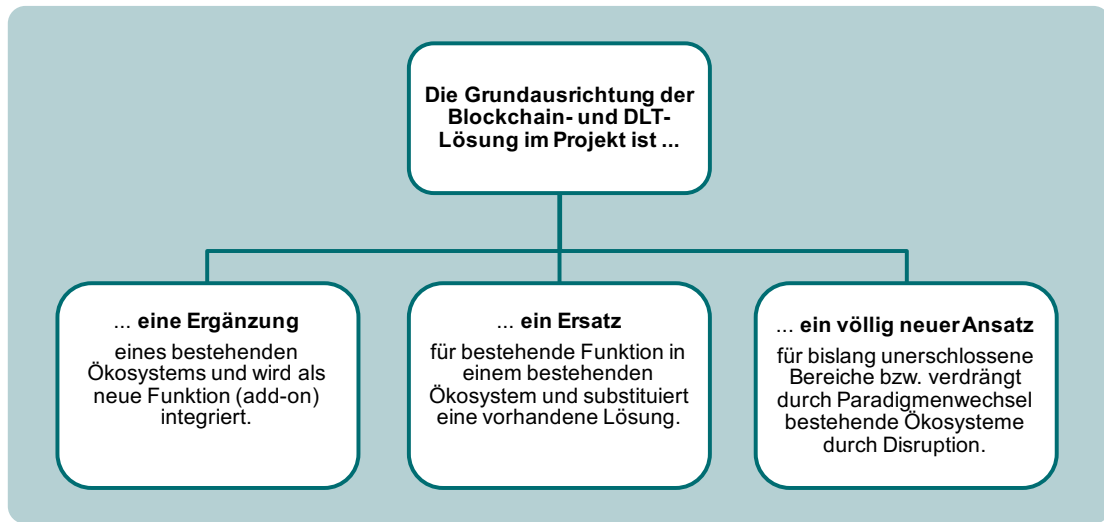


Abb. 5-4 Verschiedene Grundausrichtungen von Blockchain- und DLT-Lösungen

2. Was sind die adressierten Nutzenkategorien der Blockchain-Lösung (value pools)?

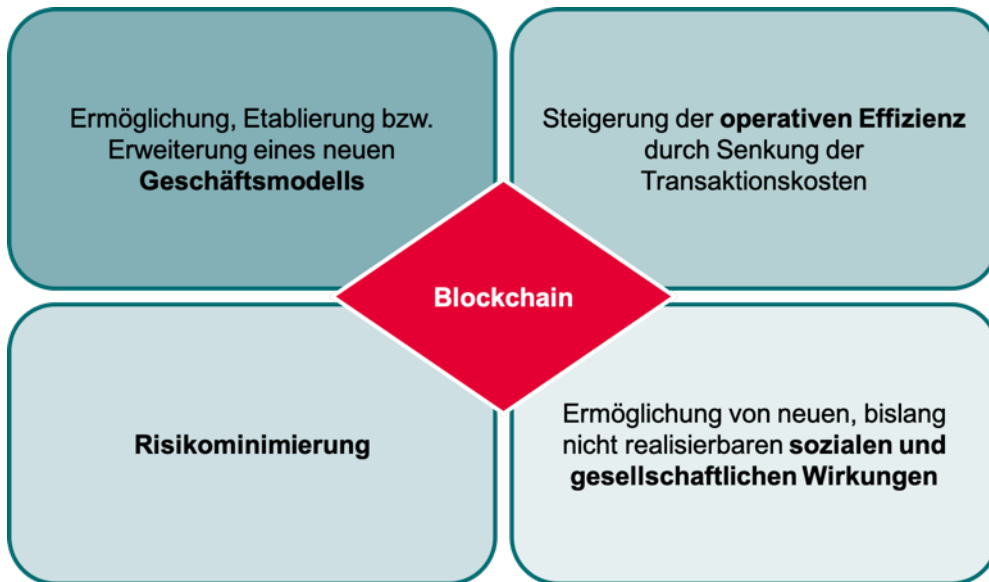


Abb. 5-5 Verschiedene Grundausrichtungen von Blockchain- und DLT-Lösungen

5.4 Konsistenzcheck der Integration der Blockchain-Technologie in die Implementierungsumgebung

Die vorliegende Kurzstudie legt den Fokus auf die Nachhaltigkeitsbewertung von Blockchain-Anwendungen. Im Folgenden werden ergänzend dazu einige technische und ökonomische Aspekte der Integration von Blockchain-/DLT-Lösungen in vorhandene IT-Systeme und Datenstrukturen angesprochen. Hier bestehen derzeit in vielen Praxisfällen die wesentlichen Hemmnisse für die Einführung und Ausweitung von Blockchain-Anwendungen.

Das Ziel dieses Abschnitts ist, den Blick zu weiten und die vollständige Perspektive der Umsetzung einer Blockchain-Lösung zu ermöglichen. Im Rahmen dieser Kurzstudie sollen diese Aspekte zunächst nur aufgeführt und als Anregung in die Diskussion eingebracht werden.

- Wie in Kapitel 2 dargestellt, erfordern viele Anwendungsfälle die **Integration von Blockchain-Lösungen in die vorhanden bzw. gleichzeitig entstehende IT-Infrastruktur** und Umgebung der beteiligten Nutzenden wie z.B. die Unternehmen einer Lieferkette. Wichtige Aufgaben umfassen dabei Fragen der Datenintegration und Schnittstellen, Interoperabilität und praktische Vernetzung (*connectivity*). Durch Normungsarbeiten, Standardisierung und zunehmende Verfügbarkeit von vorbereiteten Softwarebausteinen (*Blockchain as a Service*) werden wichtige Aspekte adressiert und die praktische Umsetzung erleichtert. Trotzdem müssen für die erfolgreiche Implementierung von Blockchain-Lösungen bei den Anwendenden notwendige Voraussetzungen geschaffen und Vorbereitungsarbeiten durchgeführt werden.
- Damit sind **Aufwände und Kosten** verbunden, die in vielen Praxisfällen zu Mehrkosten im Vergleich zu alternativen Lösungen führen und die Verbreitung von Blockchain-Anwendungen hemmen. Insbesondere bei privaten Blockchain-Netzwerken, die von Unternehmen aufgesetzt werden, kommen die Aufwände zur Etablierung einer allgemein akzeptierten Governancestruktur hinzu. Die Herausforderung ist, die unterschiedlichen Beteiligten in ein gemeinsames System einzubinden und dabei die Aufwände für partizipative Prozesse beherrschbar zu halten bzw. die Akzeptanz für die Vorgaben einer zentralen, dominierenden Instanz zu schaffen.
- Bei der Integration von Blockchain-Lösungen in ein Ökosystem ist zudem ein **Konsistenzcheck über das gesamte System** erforderlich. Das angestrebte Niveau der Datenintegrität und Sicherheit durch die Verwendung einer Blockchain muss für das gesamte System gelten – also auch für das "schwächste Glied der Kette". Der Blick muss somit z.B. auch auf die Integrität der Dateninputs gerichtet werden (vgl. Problem der Oracles bei Smart Contracts), wie auf die Nutzung von in der Blockchain gespeicherten Daten und auf die Zuverlässigkeit der tatsächlichen Implementierung von Transaktionen. Diese Aspekte werden z.B. bei einer zunehmenden Anwendung von DLT-Lösungen in IoT-Umgebungen an Bedeutung gewinnen.

Im Rahmen dieser Kurzstudie kann weder eine Methode für eine grundsätzliche Bewertung der Sinnhaftigkeit, noch für eine Evaluierung der technischen Realisierbarkeit von Blockchain-Projekten erarbeitet werden. Eine erfolgreiche technische Implementierung und ökonomisch-attraktive Skalierung ist jedoch Voraussetzung für den positiven Nutzen einer Blockchain-Lösung – und letztlich damit die Rechtfertigung für den Aufwand zu Einrichtung und Betrieb der Blockchain.

Eine operative und kommerzielle Umsetzbarkeit ist in diesem Sinne eine notwendige (aber nicht hinreichende) Bedingung für ökologische Nachhaltigkeit eines Projekts.

In der Projektbewertung sollte daher eine Prüfung der Erfolgsbedingungen und Umsetzungswahrscheinlichkeit erfolgen. Eine Ausgestaltung und operative Konkretisierung für eine Projektbewertung wären Aufgaben für weitergehende Arbeiten.

6 Fazit und Schlussfolgerungen

Als Fazit der Kurzstudie lässt sich festhalten:

Blockchain- und DLT-Technologien sind relevant – im Sinne einer allgemeinen Basistechnologie (*general purpose technology*) bieten sie breite Einsatzmöglichkeiten in den unterschiedlichsten Anwendungsfeldern. Das besondere Potenzial der Technologie liegt dabei in der Möglichkeit, Daten und Datentransaktionen eine Qualität hinsichtlich Vertrauenswürdigkeit und Integrität zu geben. Sie stellen traditionelle Paradigmen von Transaktionen und Leistungsaustausch in Frage und eröffnen neue Perspektiven, etablierte Systeme und Strukturen disruptiv zu verändern.

Technologischer Fortschritt ermöglicht Lösungsvielfalt – die Blockchain- und DLT-Technologien entwickeln sich stetig weiter. Nach dem Bitcoin-Netzwerk als Blockchain der ersten Generation und der Einführung von Smart Contracts durch Ethereum (zweite Generation) ist mittlerweile eine Vielzahl von neuen Blockchain/DLT-Ansätzen der dritten Generation verfügbar, die mit unterschiedlichen Konsensmechanismen arbeiten, neue Konzepte zur Leistungssteigerung umsetzen, z.B. durch Einführung von mehreren Netzwerk-Layern (Bitcoin Lightning), Aufteilung in Sub-Cluster (sharding) oder Parallelisierung (Side Chains), oder alternative Designprinzipien verfolgen wie z.B. der IOTA Tangle.

Energie- und Ressourcenverbräuche von Blockchain-Lösungen können drastisch gesenkt werden – die technologiebedingten hohen Energie- und Ressourcenverbräuche der PoW-Blockchains der ersten Generation können vermieden werden. Neuere, alternative Ansätze versprechen einen drastisch reduzierten Aufwand und scheinen in der Umweltwirkung mit allgemeinen digitalen Systemen wie Datenbanklösungen vergleichbar zu sein. Hinzu kommt, dass für viele Anwendung keine neue Blockchain aufgesetzt wird, sondern schon etablierte Blockchains genutzt werden (z.B. durch Dokumentation/Time Stamping von Token Transaktionen). Hierdurch entstehen nur geringe Zusatzaufwände.

Das ressourcenintensive PoW-Verfahren kann oft vermieden werden – für die meisten Probleme und Aufgaben bieten sich Blockchain-Technologien mit niedrigem Energie- und Ressourcenverbrauch an. Die frühen PoW-Ansätze der Anfangsphase haben seit 2015 in der Breite der Anwendungen an Bedeutung verloren.

Eckpunkte für eine praxistaugliche Nachhaltigkeitsbewertung von Blockchain-Lösungen sind verfügbar – aufgrund der fehlenden Datenbasis (s.u.) wird eine gestufte, qualitative Plausibilitätsprüfung vorgeschlagen, in der Leitplanken und relevante Richtungsentscheidungen der Blockchain-Lösung abgeprüft werden. Hierdurch sollen potenzielle Risiken für die Klima-, Energie- und Umweltwirkungen vermieden und die Wahrscheinlichkeit für tendenziell positive Designentscheidungen erhöht werden. Die Grundidee und mögliche Bausteine wurden skizziert.

Für die praktische Anwendung zur Projektbewertungen ist eine weitere analytische Schärfung sowie redaktionelle Überarbeitung z.B. in Form von grafisch aufbereiteten Leitfäden oder Checklisten erforderlich. Dies kann zeitnah umgesetzt werden.

Die Datengrundlage und Methodik zur Bewertung der Umweltwirkungen von Blockchain-Lösungen ist unzureichend – es fehlen belastbare und umfassende Daten zu fast allen Aspekten von Blockchain-Anwendungen. Die tatsächlichen Aufwendungen bei den Nutzenden in den zugrundeliegenden Infrastrukturen und Rechenzentren oder auch der Einfluss von Softwaredesign und Skalierungseffekten ist methodisch noch nicht systematisch bearbeitet und quantitativ vermessen.

Auf dieser Grundlage ist die **zentrale Schlussfolgerung der Kurzstudie**, dass ein über eine gestufte, qualitative Plausibilitätsprüfung hinausgehendes Verfahren zur Nachhaltigkeitsbewertung von Blockchain-Projekten und Anwendungen in Kooperation mit Fachkundigen aus Wissenschaft und Praxis ausgearbeitet werden kann – und auch zeitnah umgesetzt werden sollte.

Es wird deshalb empfohlen, ungeachtet des bestehenden Forschungsbedarf zeitnah mit der Implementierung einer Nachhaltigkeitsbewertung zu beginnen.

Es lässt sich als erster Schritt eine richtungssichere Heuristik von qualitativen Leitlinien und Prüffragen entwickeln, auch wenn die methodischen und datentechnischen Grundlagen für eine technologieoffene, rein an quantitativen Indikatoren ausgerichtete Evaluierung noch fehlen. Die Berücksichtigung derartiger Leitlinien bei der Projektentwicklung und -bewertung würde unmittelbar zur Sensibilisierung für ökologische Auswirkungen der Digitalisierung beitragen und bietet heute schon die Chance, Lerneffekte bei allen Beteiligten auszulösen und die Wissensbasis schrittweise auszubauen.

Gleichzeitig muss die Forschung zu Kennzahlen des Energie- und Ressourcenverbrauchs von digitalen Lösungen intensiviert und über die in der Umweltpolitischen Digitalagenda (BMU, 2020) genannten Maßnahmen zu Geräten und Infrastrukturen ausgeweitet werden. Es fehlen Methoden, Daten und belastbare Fallbeispiele für die ökologische Effizienz von Software, Algorithmen oder Cloud-basierten Dienstleistungen als wichtiger Treiber der Hardwarenutzung. Die Aufgabe ist, für Politik wie für die Praxis die Basis für evidenzbasierte und an Nachhaltigkeit ausgerichtete Technologieentwicklung und Technologiebewertung zu schaffen.

7 Anhang

Blockchain	Symbol	Marktkapitalisierung (in Mio. US\$)	Smart Contract	Privatsphäre	Jahr
PoW					
Bitcoin	BTC	136.000,00	Nein	Nein	2009
Ethereum	ETH	25.600,00	Ja	Nein	2014
Bitcoin Cash	BCH	6.740,00	Nein	Nein	2017
Litecoin	LTC	6.370,00	Nein	Nein	2011
Bitcoin SV	BSV	3.330,00	Nein	Nein	2018
Monero	XMR	1.440,00	Nein	Ja	2014
Ethereum Classic	ETC	845,80	Ja	Nein	2016
ZCash	ZEC	523,64	Nein	Ja	2016
Bitcoin Gold	BTG	436,26	Nein	Nein	2017
Dogecoin	DOGE	364,94	Nein	Nein	2013
Digibyte	DGB	166,93	Nein	Nein	2014
Verge	XVG	143,07	Nein	Ja	2016
Vertcoin	VTC	25,18	Nein	Nein	2017
Hybrid					
Dash	DASH	1.260,00	Nein	Nein	2014
Decred	DCR	246,28	Nein	Nein	2015
PoS					
WAVES	WAVES	225,31	Ja	Nein	2016
PIVX	PIVX	35,97	Nein	Ja	2015
DPoS					
EOS	EOS	5.670,00	Ja	Nein	2017
Cardano	ADA	2.140,00	Ja	Nein	2017
TRON	TRX	2.060,00	Ja	Nein	2017
Lisk	LSK	223,84	Ja	Nein	2016
Non-standard					
Ripple	XRP	17.140,00	Nein	Nein	2013
Stellar	XLM	2.330,00	Ja	Nein	2016
NEO	NEO	791,37	Ja	Nein	2014
NEM	XEM	725,50	Ja	Nein	2014

Tab. 7-1 Auflistung öffentlicher (public) Blockchains in angepasster Reihenfolge nach Marktkapitalisierung (Irresberger et al., 2020, S. 36)

8 Literaturverzeichnis

- Alsabah, H., & Capponi, A. (2020). *Pitfalls of Bitcoin's Proof-of-Work: R&D Arms Race and Mining Centralization* (SSRN Scholarly Paper ID 3273982). Social Science Research Network. <https://papers.ssrn.com/abstract=3273982>
- Asselot, P. (o. J.). *In a Nutshell: Blockchain and IP*. European IP Helpdesk. Abgerufen 17. Juni 2020, <http://iprhelpdesk.eu/ip-highlights/ip-special-blockchain/blockchain-in-a-nutshell#>
- BDEW. (2017). *Blockchain in der Energiewirtschaft. Potenziale für Energieversorger* (S. 81). INEWI (Institut für Energiewirtschaft) Hochschule Fresenius for BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.). https://www.bdew.de/media/documents/BDEW_Blockchain_Energiewirtschaft_10_2017.pdf
- BDEW, & pwc. (2019). *Blockchain Radar: Energie & Mobilität*. BDEW, pwc.
- Beck, R., Pedersen, A. B., Risius, M., Netcompany Group, University of Queensland, & IT University at Copenhagen. (2019). A Ten-Step Decision Path to Determine When to Use Blockchain Technologies. *MIS Quarterly Executive*, 99–115. <https://doi.org/10.17705/2msqe.00010>
- Benetton, M., Compiani, G., & Morse, A. (2019). CryptoMining: Local Evidence from China and the US. *Working Paper*, 41.
- Bitcoin-Euro | BTC/EUR | aktueller Wechselkurs. (o. J.). finanzen.net. Abgerufen 18. Juni 2020, <https://www.finanzen.net/devisen/bitcoin-euro-kurs>
- BitInfoCharts. (2020, September). *Bitcoin, Litecoin, Namecoin, Dogecoin, Peercoin, Quarkcoin, Worldcoin, Feathercoin statistik*. BitInfoCharts. <https://bitinfocharts.com/de/>
- Bitkom. (2019). *Evaluierung und Implementierung von Blockchain Use Cases*. Bitkom e.V.
- Blockchair. (2020, September). *Ethereum blockchain size chart—Blockchair*. <https://blockchair.com/ethereum/charts/blockchain-size>
- BMU. (2020). *Umweltpolitische Digitalagenda* (S. 82). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). <https://www.bmu.de/digitalagenda/>
- BMWi, & BMF. (2019). *Blockchain-Strategie der Bundesregierung*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; Bundesministerium der Finanzen. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/blockchain-strategie.pdf?__blob=publicationFile&v=22
- Brown-Cohen, J., Narayanan, A., Psomas, A., & Weinberg, S. M. (2019). Formal Barriers to Longest-Chain Proof-of-Stake Protocols. *Proceedings of the 2019 ACM Conference on Economics and Computation*, 459–473. <https://doi.org/10.1145/3328526.3329567>
- Buterin, V., Reijbergen, D., Leonardos, S., & Piliouras, G. (2020). Incentives in Ethereum's Hybrid Casper Protocol. *International Journal of Network Management*. <https://doi.org/10.1002/nem.2098>
- Carson, B., Romanelli, G., Walsh, P., & Zhumaev, A. (2018, Juni 19). *The strategic business value of the blockchain market* | McKinsey [McKinsey & Company]. <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/blockchain-beyond-the-hype-what-is-the-strategic-business-value>
- Chase, B., & MacBrough, E. (2018). Analysis of the XRP Ledger Consensus Protocol. *arXiv:1802.07242 [cs]*. <http://arxiv.org/abs/1802.07242>
- Chen, L., Xu, L., Shah, N., Gao, Z., Lu, Y., & Shi, W. (2017). On Security Analysis of Proof-of-Elapsed-Time (PoET). In P. Spirakis & P. Tsigas (Hrsg.), *Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems* (Bd. 10616, S. 282–297). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69084-1_19
- Chowdhury, M. J. M., Colman, A., Kabir, M. A., Han, J., & Sarda, P. (2018). Blockchain Versus Database: A Critical Analysis. *2018 17th IEEE International Conference On Trust, Security And Privacy In Computing And Communications/ 12th IEEE International Conference On Big Data*

- Science And Engineering (TrustCom/BigDataSE)*, 1348–1353.
<https://doi.org/10.1109/TrustCom/BigDataSE.2018.00186>
- CoinMarketCap. (2020, August). *Cryptocurrency Market Capitalizations*. CoinMarketCap.
<https://coinmarketcap.com/>
- CompTIA, & Blockchain Advisory Council. (2019). *When is blockchain or another database the right choice?*
- De Angelis, S., Aniello, L., Baldoni, R., Lombardi, F., Margheri, A., & Sassone, V. (2018). *PBFT vs Proof-of-Authority: Applying the CAP Theorem to Permissioned Blockchain*. 11.
- de Vries, A. (2019a). Renewable Energy Will Not Solve Bitcoin's Sustainability Problem. *Joule*, 3(4), 893–898. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.02.007>
- de Vries, A. (2019b, Juni 11). *Bitcoiners and environmental concerns: A day into the lion's den*. Digiconomist.
<https://digiconomist.net/bitcoiners-and-environmental-concerns-a-day-into-the-lions-den/>
- de Vries, A. (2020a). Bitcoin's energy consumption is underestimated: A market dynamics approach. *Energy Research & Social Science*, 70, 101721. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101721>
- de Vries, A. (2020b, Mai). *Bitcoin Electronic Waste Monitor*. Digiconomist.
<https://digiconomist.net/bitcoin-electronic-waste-monitor/>
- de Vries, A. (2021a, Juni). *Bitcoin Energy Consumption Index*. Digiconomist.
<https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption/>
- de Vries, A. (2021b, Juni). *Ethereum Energy Consumption Index (beta)*. Digiconomist.
<https://digiconomist.net/ethereum-energy-consumption>
- dena, Richard, P., Mamel, S., & Vogel, L. (2019). *Blockchain in der integrierten Energiewende*. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).
- Dispenza, J., Garcia, C., & Molecke, R. (2017). Energy Efficiency Coin (EECoin) A Blockchain Asset Class Pegged to Renewable Energy Markets. *Working Paper*, 6.
- Do, T., Nguyen, T., & Pham, H. (2019). Delegated Proof of Reputation: A Novel Blockchain Consensus. *Proceedings of the 2019 International Electronics Communication Conference*, 90–98. <https://doi.org/10.1145/3343147.3343160>
- Eigelshoven, F., Ullrich, A., & Gronau, N. (2020). Konsens-Algorithmen von Blockchain. *Industrie 4.0 Management*, 2020(2), 29–32. https://doi.org/10.30844/I40M_20-1_S29-32
- Ferdous, M. S., Chowdhury, M. J. M., Hoque, M. A., & Colman, A. (2020). Blockchain Consensus Algorithms: A Survey. *arXiv:2001.07091 [cs]*. <http://arxiv.org/abs/2001.07091>
- Gartner. (2019, September). *Hype Cycle for Blockchain Business*. Gartner.
<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-09-12-gartner-2019-hype-cycle-for-blockchain-business-shows>
- GIZ, Maupin, J., Kahlert, J., Honsel, T., Peter, V., Hess, U., & Fischle, R. (2019). *Blockchain: A World Without Middlemen?* (S. 92). Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH Blockchain Lab.
- Gräther, W., Kolvenbach, S., Ruland, R., Schütte, J., Torres, C., & Wendland, F. (2018). *Blockchain for Education: Lifelong Learning Passport*. https://doi.org/10.18420/blockchain2018_07
- Hanada, Y., Hsiao, L., & Levis, P. (2018). Smart Contracts for Machine-to-Machine Communication: Possibilities and Limitations. *2018 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IOTAIS)*, 130–136. <https://doi.org/10.1109/IOTAIS.2018.8600854>
- Herweijer, C., Waughray, D., & Warren, S. (2018). *Building Block(chain)s for a Better Planet*. http://www3.weforum.org/docs/WEF_Building-Blockchains.pdf
- Sandner, P. (2019, Dezember). *How Should Companies Select a Specific Blockchain Framework?* Medium.

- <https://philippsandner.medium.com/how-should-companies-select-a-specific-blockchain-framework-8d07eb7875a6>
- Irresberger, F. (2018). *Coin Concentration of Proof-of-Stake Blockchains* (SSRN Scholarly Paper ID 3293694). Social Science Research Network. <https://papers.ssrn.com/abstract=3293694>
- Irresberger, F., John, K., & Saleh, F. (2020). *The Public Blockchain Ecosystem: An Empirical Analysis* (SSRN Scholarly Paper ID 3592849). Social Science Research Network. <https://papers.ssrn.com/abstract=3592849>
- Johnson, S. K. (2017, Dezember 13). *Just 20 percent of e-waste is being recycled*. Ars Technica. <https://arstechnica.com/science/2017/12/just-20-percent-of-e-waste-is-being-recycled/>
- Kiayias, A., Russell, A., David, B., & Oliynykov, R. (2017). Ouroboros: A Provably Secure Proof-of-Stake Blockchain Protocol. In J. Katz & H. Shacham (Hrsg.), *Advances in Cryptology – CRYPTO 2017* (S. 357–388). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63688-7_12
- King, S., & Nadal, S. (2012). *PPCoin: Peer-to-Peer Crypto-Currency with Proof-of-Stake* (S. 6) [White Paper]. <https://www.chainwhy.com/upload/default/20180619/126a057fef926dc286accb372da46955.pdf>
- Klebsch, W., Hallensleben, S., & Kosslers, S. (2019). *Roter Faden durch das Thema Blockchain* (S. 28). VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
- Klein, S., Prinz, W., & Gräther, W. (2018). *A Use Case Identification Framework and Use Case Canvas for identifying and exploring relevant Blockchain opportunities*. 10.
- Koomey, J., Berard, S., Sanchez, M., & Wong, H. (2011). Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing. *IEEE Annals of the History of Computing*, 33(3), 46–54. <https://doi.org/10.1109/MAHC.2010.28>
- Kostal, K., Krupa, T., Gembec, M., Veres, I., Ries, M., & Kotuliak, I. (2018). On Transition between PoW and PoS. *2018 International Symposium ELMAR*, 207–210. <https://doi.org/10.23919/ELMAR.2018.8534642>
- Li, A., Wei, X., & He, Z. (2020). Robust Proof of Stake: A New Consensus Protocol for Sustainable Blockchain Systems. *Sustainability*, 12(7), 2824. <https://doi.org/10.3390/su12072824>
- Look, C. (2019, Mai 29). Blockchain Settlement Was Slow, Costly in Trial, Weidmann Says. *Bloomberg.Com*. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-05-29/blockchain-settlement-was-slow-costly-in-trial-weidmann-says>
- McCook, H. (2015). *An Order-of-Magnitude Estimate of the Relative Sustainability of the Bitcoin Network* (Working Paper 3rd Edition; S. 37). https://www.academia.edu/7666373/An_Order-of-Magnitude_Estimate_of_the_Relative_Sustainability_of_the_Bitcoin_Network_-_3rd_Edition
- Mora, C., Rollins, R. L., Taladay, K., Kantar, M. B., Chock, M. K., Shimada, M., & Franklin, E. C. (2018). Bitcoin emissions alone could push global warming above 2°C. *Nature Climate Change*, 8(11), 931–933. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0321-8>
- Nakamoto, S. (2008). *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- Nascimento, S., Pólvara, A., Anderberg, A., Andonova, E., Bellia, M., Calès, L., Inamorato dos Santos, A., Kounelis, I., Nai Fovino, I., Petracco Giudici, M., Papanagiotou, E., Sobolewski, M., Rossetti, F., Spirito, L., European Commission, & Joint Research Centre. (2019). *Blockchain now and tomorrow: Assessing multidimensional impacts of distributed ledger technologies*. http://publications.europa.eu/publication/manifestation_identifier/PUB_KJNA29813ENN
- Natarajan, H., Krause, S., & Gradstein, H. (2017). *Distributed Ledger Technology (DLT) and Blockchain*. World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/177911513714062215/pdf/122140-WP-PUBLIC-Distributed-Ledger-Technology-and-Blockchain-Fintech-Notes.pdf>

- Nguyen, C. T., Hoang, D. T., Nguyen, D. N., Niyato, D., Nguyen, H. T., & Dutkiewicz, E. (2019). Proof-of-Stake Consensus Mechanisms for Future Blockchain Networks: Fundamentals, Applications and Opportunities. *IEEE Access*, 7, 85727–85745. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2925010>
- O'Halloran, D., Yong Zhang, R., & O'Sullivan, D. (2015). *Deep Shift: Technology Tipping Points and Societal Impact*. World Economic Forum.
- Osterland, T., & Rose, T. (2018). *Engineering sustainable blockchain applications*. https://doi.org/10.18420/BLOCKCHAIN2018_05
- Pemberton Levy, H. (2019, Oktober 22). *The Reality of Blockchain*. www.gartner.com/smarterwithgartner/the-reality-of-blockchain/
- Popov, S. (2017). The tangle. *IOTA, Whitepaper*, 1.3, 1–28.
- Rafati Niya, S., Schüpfer, F., Bocek, T., & Stiller, B. (2018). A Peer-to-peer Purchase and Rental Smart Contract-based Application (PuRSCA). *it - Information Technology*, 60(5–6), 307–320. <https://doi.org/10.1515/itit-2017-0036>
- Ramesohl, S., & Berg, H. (2019). *Digitalisierung in die richtige Richtung lenken—Eckpunkte für Wissenschaft und Politik* [Wuppertal InBrief]. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- Reetz, F. (2019). *Blockchain & das Klima*. Stiftung Neue Verantwortung e.V.
- Rosu, I., & Saleh, F. (2020). *Evolution of Shares in a Proof-of-Stake Cryptocurrency* (SSRN Scholarly Paper ID 3377136). Social Science Research Network. <https://papers.ssrn.com/abstract=3377136>
- Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2117–2135. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261>
- Saleh, F. (2020). *Blockchain Without Waste: Proof-of-Stake* (SSRN Scholarly Paper ID 3183935). Social Science Research Network. <https://papers.ssrn.com/abstract=3183935>
- Sallaba, M., Siegel, D., Becker, S., Wiedmann, P., Brenner, T., & Giessen, W. (2018). *IoT powered by Blockchain*. Deloitte Blockchain Institute. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/Innovation/IoT-powered-by-Blockchain-Deloitte.pdf>
- Serpell, O. (2018). *Energy and the Blockchain. Opportunities and challenges for climate and energy governance* (S. 11). Kleinman Center for Energy Policy, University of Pennsylvania, School of Design. <https://kleinmanenergy.upenn.edu/sites/default/files/policydigest/Energy%20and%20the%20Blockchain.pdf>
- Shoker, A. (2018). Brief Announcement: Sustainable Blockchains through Proof of eXercise. *Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*, 269–271. <https://doi.org/10.1145/3212734.3212781>
- Shoker, A. (2017). Sustainable blockchain through proof of exercise. *2017 IEEE 16th International Symposium on Network Computing and Applications (NCA)*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/NCA.2017.8171383>
- Sønstebo, D. (2017, Juni). IOTA: The Transparency Compendium. *Medium*. <https://blog.iota.org/the-transparency-compendium-26aa5bb8e260>
- Stoll, C., Klaaßen, L., & Gallersdörfer, U. (2019). The Carbon Footprint of Bitcoin. *Joule*, 3(7), 1647–1661. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.05.012>
- Strohmayr, B., & Reetz, F. (2019). *Smarte Sektorenkopplung, Digitalisierung und Distributed Ledger Technologien*. Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Positionspapiere_Stellungnahmen/BEE/20190827_BEE-Diskussionspapier_Smarte_Sektorenkopplung_Digitalisierung_und_Distributed_Ledger_Technologien.pdf

- UNDP. (2018). *The Future is Decentralised: Block Chains, Distributed Ledgers, & the Future of Sustainable Development*. United Nations Development Programme.
<https://www.undp.org/publications/future-decentralised>
- Visa Inc. (2020). *Corporate Responsibility & Sustainability Report* (Nr. 5; S. 52). Visa Inc.
<https://usa.visa.com/dam/VCOM/download/corporate-responsibility/visa-2019-corporate-responsibility-report.pdf>
- Voshmgir, S., Novakovic, T., Wildenberg, M., Rammel, C., Kalinov, V., Greinöcker, A., Medina, A., Parfenova, S., Smoljan, M., & Johnson, M. (2019). *Blockchain, Web3 & SDGs*. Research Institute for Cryptoeconomics.
- Wall, E. (2017, Juni 14). IOTA is centralized. *Eric Wall*.
<https://medium.com/@ercwl/iota-is-centralized-6289246e7b4d>
- Wood, G. (2014). Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger. *Ethereum Project Yellow Paper*, 32.
- Wust, K., & Gervais, A. (2018). Do you Need a Blockchain? *2018 Crypto Valley Conference on Blockchain Technology (CVCBT)*, 45–54. <https://doi.org/10.1109/CVCBT.2018.00011>
- Yusuf, Z., Bhatia, A., Russo, M., Gill, U., Kranz, M., & Nannra, A. (2018). *Are Blockchain and the Internet of Things Made for Each Other?* The Boston Consulting Group; Cisco Systems.
<https://www.bcg.com/de-de/publications/2018/blockchain-internet-of-things-made-for-each-other>
- Zohair. (2017, März). *How Much Energy Does Bitcoin Use? A Lot It Turns Out*. Online Security News, Reviews, How To and Hacks. <https://securitygladiators.com/bitcoin-uses-energy-a-lot/>