

TEXTE

41/2026

Schlussbericht

# Umweltbewertung und regulatorische Herausforderungen von DLT-Lösungen

von:

Dr. Matthias Hafner, Beatrix Marosvölgyi, Dr. Nicolas Eschenbaum, Romain de Luze, Elena Zarković, Dr. Samuel Rutz

Swiss Economics SE AG, Zürich Schweiz

Prof. Dr. Tim Weingärtner  
Departement für Informatik der Hochschule Luzern, Rotkreuz Schweiz

Johannes Erny,  
Freiburg Deutschland

Herausgeber:

Umweltbundesamt



TEXTE 41/2026

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für  
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und  
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3723 11 101 1  
FB001750

Schlussbericht

# **Umweltbewertung und regulatorische Herausforderungen von DLT-Lösungen**

von

Dr. Matthias Hafner, Beatrix Marosvölgyi, Dr. Nicolas  
Eschenbaum, Romain de Luze, Elena Zarković, Dr. Samuel  
Rutz

Swiss Economics SE AG, Zürich Schweiz

Prof. Dr. Tim Weingärtner

Departement für Informatik der Hochschule Luzern,  
Rotkreuz Schweiz

Johannes Erny,  
Freiburg Deutschland

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

## Impressum

### Herausgeber

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
buergerservice@uba.de  
Internet: www.umweltbundesamt.de

### Durchführung der Studie:

Swiss Economics SE AG  
Ottikerstrasse 7  
8006 Zürich  
Schweiz

### Abschlussdatum:

November 2024

### Redaktion:

Fachgebiet Z 2.3 Digitale Transformation und Beratungsstelle Green IT  
Anna Zagorski & Dirk Osiek

### DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8063>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, März 2026

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen\*Autoren.

Disclaimer: Dieser Bericht wurde von Swiss Economics SE AG (Swiss Economics) unter Beizug von der Hochschule Luzern und Johannes Erny im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellt. Obwohl Swiss Economics und ihre Partner sich bemühen, nur wahre und korrekte Informationen zu verwenden und eigene Aussagen sorgfältig zu tätigen, kann hinsichtlich der Richtigkeit, Aktualität, Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Vollständigkeit und Verwendbarkeit der nachfolgenden Informationen keine Gewähr oder Haftung übernommen werden. Swiss Economics und seine Partner haften in keinem Fall für Schäden oder Folgeschäden jeglicher Art, die in irgendeiner Weise im Zusammenhang den nachfolgend bereitgestellten Informationen stehen. Die nachfolgenden Informationen stellen keine rechtliche Beratung dar.

**Kurzbeschreibung: Umweltbewertung und regulatorische Herausforderungen von DLT-Lösungen**

Distributed-Ledger-Technologie (DLT), insbesondere Blockchain, gilt als zukunftsweisend, ist jedoch je nach Implementierung mit erheblichem Energie- und Ressourcenverbrauch verbunden. Diese Studie untersucht die Umweltauswirkungen von Blockchain-Anwendungen, vergleicht sie mit alternativen Technologien und diskutiert regulatorische Rahmenbedingungen für nachhaltigere Lösungen. Vier Anwendungsfälle – Bitcoin, Ethereum, ein dezentraler Energiemarkt und der Handel mit Green Bonds – wurden mittels Ökobilanz (Life-Cycle Assessment) analysiert. Um die Umweltauswirkungen zu quantifizieren, wurde ein Bottom-up-Modell entwickelt, das den Ressourcen- und Energieverbrauch verschiedener Blockchain-Anwendungen in Bezug auf den abiotischen Rohstoffverbrauch (ADP), den Strom- sowie Energiebedarf (KSA bzw. KEA) sowie die Treibhausgasemissionen (GWP) abschätzt. Die Ergebnisse zeigen, dass Proof-of-Work (POW)-Systeme wie Bitcoin deutlich höhere Umweltbelastungen verursachen als Proof-of-Stake (POS)-Alternativen wie Ethereum. Zudem zeigt sich, dass Blockchain für reine Rechenoperationen ungeeignet ist, jedoch beim Austausch von Werten Effizienzgewinne ermöglichen kann, indem sie bestehende Intermediäre zumindest teilweise ersetzt. Rechtlich betrachtet sind Smart Contracts grundsätzlich für den Vertragsabschluss zulässig, Umweltaspekte wurden jedoch bislang unzureichend berücksichtigt. Bestehende regulatorische Rahmenwerke erfassen negative Externalitäten nicht vollständig, was zu „Carbon Leakage“ führen kann. Als mögliche Maßnahmen wurden Umweltlabels, Nachhaltigkeitsberichte, Steuern und andere marktorientierte Massnahmen sowie Verbote diskutiert. Die Studie kommt zum Schluss, dass POW-Blockchains erhebliche Umweltkosten verursachen, die nicht vollständig internalisiert sind, sodass regulatorische Eingriffe in Erwägung gezogen werden sollten. Weder bestehende Regulierungen noch mögl. Maßnahmen bieten jedoch durchgehend überzeugende Lösungen. Für das weitere Vorgehen wird eine vertiefte Kosten-Nutzen-Analyse der identifizierten relevanten Maßnahmen empfohlen.

**Abstract: Environmental Assessment and Regulatory Challenges of DLT Solutions**

Distributed Ledger Technology (DLT), particularly blockchain, is considered innovative but, depending on its implementation, can be associated with significant energy and resource consumption. This study examines the environmental impact of blockchain applications, compares them with alternative technologies, and discusses regulatory frameworks for more sustainable solutions. Four use cases – Bitcoin, Ethereum, a decentralized energy market, and the trading of Green Bonds – were analyzed using a life cycle assessment (LCA). To quantify the environmental impact, a bottom-up model was developed to estimate the resource and energy consumption of various blockchain applications in terms of abiotic resource depletion (ADP), power and energy demand (KSA and KEA), and greenhouse gas emissions (GWP). The results show that Proof-of-Work (POW) systems like Bitcoin cause significantly higher environmental impacts than Proof-of-Stake (POS) alternatives such as Ethereum. Furthermore, blockchain technology is unsuitable for pure computational tasks but can improve efficiency in value exchange by at least partially replacing existing intermediaries. From a legal perspective, Smart Contracts are permissible under civil law; however, environmental aspects have so far been insufficiently addressed. Existing regulatory frameworks do not fully account for negative externalities, potentially leading to carbon leakage. Proposed measures include environmental labeling, sustainability reporting, taxes, other market-oriented measures, and outright bans. The study concludes that POW-based blockchains generate substantial environmental costs that are not completely internalized, suggesting that regulatory interventions should be considered. However, neither existing regulations nor the proposed measures provide fully convincing solutions. For future action, an in-depth cost-benefit analysis of the identified relevant measures is recommended.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	10
Tabellenverzeichnis.....	11
Abkürzungsverzeichnis .....	12
Zusammenfassung.....	16
Summary .....	27
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>37</b>
1.1 Ausgangslage.....	37
1.2 Auftrag / Zielsetzung .....	38
1.3 Vorgehen .....	39
1.4 Struktur des Berichts.....	39
<b>2 DLT-Lösungen in praktischen Anwendungsfällen.....</b>	<b>40</b>
2.1 Literaturrecherche .....	40
2.1.1 Die Erfahrungen und Erkenntnisse aus den früheren Forschungsprojekten des Umweltbundesamtes.....	40
2.1.2 Potentieller Mehrwert von DLT-Anwendungen .....	45
2.1.3 Bereits entwickelte und etablierte Methoden für die Messung der Umweltwirkung von DLT .....	47
2.1.4 Aktueller Wissensstand über der Ressourcen- und Energieaufwände von DLT- Lösungen.....	54
2.1.5 Vorhandene Datensätze bezüglich der Umweltwirkung von DLT-Lösungen.....	61
2.1.6 Fazit.....	65
2.2 Auswahl der relevanten Anwendungsfälle.....	66
2.2.1 Bitcoin – Vertreter der POW-Blockchains.....	67
2.2.2 Ethereum als das wichtigste Blockchain Protokoll für Smart Contracts.....	68
2.2.3 P2P-Energiemärkte als ein Anwendungsbeispiel im Strommarkt .....	69
2.2.4 Green Bonds als Beispiel für die Möglichkeiten der Tokenisierung von Vermögenswerten .....	70
<b>3 Umweltbewertung.....</b>	<b>72</b>
3.1 POW-Blockchains und Bitcoin .....	73
3.1.1 Methodik.....	73
3.1.2 Ergebnisse .....	76
3.1.3 Diskussion und Fazit.....	78
3.2 Ethereum und andere POS-Blockchains.....	79
3.2.1 Methodik.....	79

3.2.2	Ergebnisse .....	83
3.2.3	Diskussion und Fazit.....	84
3.3	Lokale Energiemärkte.....	85
3.3.1	Methodik.....	85
3.3.2	Ergebnisse .....	86
3.3.3	Diskussion und Fazit.....	87
3.4	Green Bonds.....	88
3.4.1	Methodik.....	88
3.4.2	Ergebnisse .....	89
3.4.3	Diskussion und Fazit.....	90
3.5	Zwischenfazit.....	90
4	Regulatorische Herausforderungen und Anforderungen für den Einsatz von Blockchain .....	92
4.1	Einleitende Bemerkung.....	92
4.2	Zivilrechtliche Anforderungen an die Ausgestaltung von Smart Contracts .....	92
4.2.1	Vertragsschluss unter Einsatz von Smart Contracts .....	95
4.2.2	Automatisierte Vertragsdurchführung unter Einsatz von Smart Contracts .....	102
4.2.3	Zusammenfassung Zivilrecht .....	107
4.3	Datenschutzrechtliche Herausforderungen .....	108
4.4	Analyse des regulatorischen Rahmens .....	118
4.4.1	Methode: Ökologische Analyse des Rechts .....	118
4.4.2	Darstellung des regulatorischen Rahmens .....	120
4.4.3	Identifikation von Anreizen durch den bestehenden regulatorischen Rahmen .....	131
4.4.4	Anreize außerhalb der Blockchain-spezifischen Regulierung.....	147
5	Entwicklung von Empfehlungen für eine Anpassung des regulatorischen Rahmens.....	153
5.1	Ausgangslage.....	153
5.1.1	Nachhaltigkeit und Klimaschutz als verfassungsrechtliche Vorgaben.....	153
5.1.2	Zusammenhang zwischen Blockchain und Treibhausgasemissionen.....	154
5.1.3	Zusammenhang zwischen Blockchain und anderen Nachhaltigkeitsaspekten .....	155
5.1.4	EU-ETS als Anreiz für Reduktion der Treibhausgasemissionen .....	156
5.1.5	Regulierungsziele .....	156
5.1.6	Ansatzpunkte für Instrumente zur Erreichung der Regulierungsziele.....	157
5.2	Spezifische Herausforderungen bei der Regulierung von Blockchain.....	159
5.2.1	Dezentralität .....	159
5.2.2	Internationalität.....	161

5.2.3	Pseudonymität .....	164
5.2.4	Zwischenfazit .....	164
5.3	Typisierung von Regulierungsmaßnahmen .....	165
5.3.1	Ordnungsrechtliche Instrumente.....	165
5.3.2	Informativische Instrumente .....	166
5.3.3	Freiwillige Vereinbarungen.....	166
5.3.4	Ökonomische Instrumente .....	167
5.4	Regulierungsmaßnahmen im Einzelnen.....	168
5.4.1	Verbot von Mining .....	169
5.4.2	Verbot des Besitzes und des Handels von POW-basierten Kryptowerten .....	173
5.4.3	Umweltverträglichkeitsprüfung für Mining-Farmen .....	175
5.4.4	Umwetlabel für Blockchains .....	179
5.4.5	Informationskampagne über den Energieaufwand neuer Technologien.....	183
5.4.6	Selbstverpflichtungen von Unternehmen.....	185
5.4.7	Importzölle, Abgaben und Subventionen bei der Erneuerung der Hardware.....	187
5.4.8	Transaktionssteuer für Kryptowerte.....	190
5.4.9	Verlängerung der Spekulationsfrist auf zehn Jahre .....	193
5.4.10	Cap-and-Trade-System .....	196
5.5	Zwischenfazit.....	201
6	Schlussfolgerungen.....	205
7	Quellenverzeichnis.....	210
A	Anhang: Detaillierte Beschreibung der Methodik der quantitativen Analyse.....	225
A.1	POS-Blockchains und Anwendungen .....	225
A.1.1	Modellierung des Netzwerkes .....	225
A.1.2	Herstellungsphase.....	226
A.1.3	Nutzungsphase.....	237
A.2	POW-Blockchains und Anwendungen .....	244
A.2.1	Modellierung des Netzwerkes .....	244
A.2.2	Herstellungsphase.....	245
A.2.3	Nutzungsphase.....	249
A.3	Lokale Energiemärkte.....	252
A.3.1	Modellierung des Netzwerkes .....	252
A.3.2	Herstellungsphase.....	252
A.3.3	Nutzungsphase.....	254

A.4	Digitaler Green Bond.....	256
A.4.1	Modellierung des Netzwerkes .....	256
A.4.2	Herstellungsphase.....	256
A.4.3	Nutzungsphase.....	257
A.5	Limitationen der Methodik .....	257
B	Anhang: SWOT-Analyse.....	259
B.1	Bitcoin .....	259
B.2	Ethereum.....	260
B.3	Lokale Energiemärkte.....	261
B.4	Green Bonds.....	262

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vergleich der Treibhausgasemissionen in kg CO <sub>2</sub> eq./a je Transaktion .....	21
Abbildung 2:	Systematik der Bewertungskriterien aus der Softwarebewertungsstudie des Umweltbundesamtes .....	41
Abbildung 3:	Schematische Darstellung der Systemgrenzen der Ökobilanzierung in der KPI4DCE-Studie .....	43
Abbildung 4:	Lebenszyklus eines Produkts .....	51
Abbildung 5:	Analyse der Energieverbräuche verschiedener DLT-Protokolle auf Transaktionsebene .....	53
Abbildung 6:	Volumen des Bitcoin-Minings nach Hashrate (2022) .....	56
Abbildung 7:	Geschätzter Strombedarf von herkömmlichen Rechenzentren, speziellen KI-Rechenzentren und dem Betrieb verschiedener Blockchains .....	57
Abbildung 8:	Detaillierte Schritte in der Bestimmung des Umweltaufwandes von Bitcoin .....	75
Abbildung 9:	Dreistufiges Vorgehen der Bestimmung des Umweltaufwandes von Ethereum .....	79
Abbildung 10:	Detaillierte Schritte in der Bestimmung des Umweltaufwandes von Ethereum .....	81
Abbildung 11:	Berechnungsablauf der Herstellung der CPUs.....	227
Abbildung 12:	Berechnungsablauf der Herstellung der RAM-Module .....	229
Abbildung 13:	Berechnungsablauf der Herstellung der SSD.....	231
Abbildung 14:	Abbildung der gemessenen Chips .....	245
Abbildung 15:	SWOT-Analyse Ergebnisse von POW-Blockchains.....	259
Abbildung 16:	SWOT-Analyse Ergebnisse von POS-Blockchains und Ethereum .....	260
Abbildung 17:	SWOT-Analyse Ergebnisse zu den lokalen Energiemärkten....	261
Abbildung 18:	SWOT-Analyse Ergebnisse des Green Bonds Anwendungsfalls .....	262

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ergebnisse der quantitativen Bewertung von POW-Blockchains und Bitcoin.....	18
Tabelle 2:	Ergebnisse der quantitativen Bewertung von POS-Blockchains und Ethereum.....	19
Tabelle 3:	Ergebnisse der quantitativen Bewertung von lokalen Energiemärkten .....	20
Tabelle 4:	Ergebnisse der quantitativen Bewertung von Green Bonds.....	20
Tabelle 5:	Kategorisierung der Regulierungsmaßnahmen .....	24
Tabelle 6:	Zusammenstellung veröffentlichter Treibhausgasemissionsschätzungen für diverse Blockchains ...	54
Tabelle 7:	Datenübersicht Ethereum .....	62
Tabelle 8:	Datenübersicht Bitcoin .....	64
Tabelle 9:	Technologische Einordnung der Anwendungsfälle.....	66
Tabelle 10:	Ergebnisse der quantitativen Bewertung von POW-Blockchains und Bitcoin.....	76
Tabelle 11:	Ergebnisse der quantitativen Bewertung von POS-Blockchains und Ethereum.....	83
Tabelle 12:	Ergebnisse der quantitativen Bewertung von lokalen Energiemärkten .....	86
Tabelle 13:	Ergebnisse der quantitativen Bewertung von Green Bonds.....	89
Tabelle 14:	Kategorisierung der Regulierungsmaßnahmen .....	169
Tabelle 15:	POS-Hardwarekonfigurationen.....	225
Tabelle 16:	Hardware-Verteilung .....	226
Tabelle 17:	Ergebnisse für Hardware <sub>2,ADP</sub> .....	234
Tabelle 18:	KPIs für Hardware 1, 2 und 3.....	235
Tabelle 19:	Wirkungskategorien für Hardware 1, 2 und 3 pro Jahr .....	235
Tabelle 20:	Durchschnittliche marginale elektrische Leistung für den Betrieb von Clients mit Hardware 1 .....	238
Tabelle 21:	Durchschnittliche marginale elektrische Leistung für den Betrieb von Clients mit Hardware 2 .....	238
Tabelle 22:	Durchschnittliche marginale elektrische Leistung für den Betrieb von Clients mit Hardware 3 .....	239
Tabelle 23:	Verteilung der Konsens-Clients.....	240
Tabelle 24:	Verteilung der Ausführung-Clients (konstant über die Zeit)...	240
Tabelle 25:	POW-Hardwarekonfigurationen .....	244
Tabelle 26:	Ergebnisse für S19j Pro .....	247
Tabelle 27:	KPIs für Hardware 1, 2 und 3.....	248
Tabelle 28:	KPIs für Hardware 1, 2 und 3 pro Jahr .....	248
Tabelle 29:	Lokale Energiemärkte Hardwarekonfigurationen.....	252
Tabelle 30:	Ergebnisse für Raspberry Pi <sub>ADP</sub> .....	253

## Abkürzungsverzeichnis

<b>aA</b>	andere Ansicht
<b>ABCI</b>	Application Blockchain Interface
<b>ABl.</b>	Amtsblatt der Europäischen Union
<b>Abs.</b>	Absatz
<b>ADP</b>	Abiotic Depletion Potential / Abiotischer Rohstoffverbrauch
<b>AEUV</b>	Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union
<b>allg.</b>	allgemein
<b>AnlEntG</b>	Anlegerentschädigungsgesetz
<b>ASIC</b>	Application Specific Integrated Circuit
<b>B2B</b>	Business-to-Business
<b>BDSG</b>	Bundesdatenschutzgesetz
<b>Beschl.</b>	Beschluss
<b>BFH</b>	Bundesfinanzhof
<b>BFT</b>	Byzantine-fault tolerant
<b>BGB</b>	Bürgerliches Gesetz Buch
<b>BGBI.</b>	Bundesgesetzblatt
<b>BGH</b>	Bundesgerichtshof
<b>BGHZ</b>	Amtliche Entscheidungssammlung der Zivilsenate des Bundesgerichtshofs
<b>bspw.</b>	beispielsweise
<b>BTC</b>	Bitcoin
<b>BT-Drs.</b>	Bundestagsdrucksache
<b>BVerfG</b>	Bundesverfassungsgericht
<b>BVerfGE</b>	Amtliche Entscheidungssammlung des Bundesverfassungsgerichts
<b>BVerwG</b>	Bundesverwaltungsgericht
<b>bzw.</b>	beziehungsweise
<b>CBECI</b>	Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index
<b>CCAF</b>	Cambridge Center for Alternative Finance
<b>CCRI</b>	Cambridge Carbon Rating Institute
<b>CPU</b>	Central Processing Units
<b>DA-Entwurf</b>	Data Act-Entwurf (COM (2022) 68 final)
<b>DAO</b>	Decentralized Autonomous Organisation
<b>DApps</b>	Decentralized Applications
<b>DeFi</b>	Decentralized Finance
<b>DER</b>	Distributed Energy Resources
<b>div.</b>	diverse
<b>DLT</b>	Distributed Ledger Technologie
<b>DS-GVO</b>	Datenschutz-Grundverordnung

<b>aA</b>	andere Ansicht
<b>eIDAS</b>	Electronic Identification, Authentication and Trust Services
<b>EGBGB</b>	Einführungsgesetz zum Bürgerlichen Gesetzbuche
<b>EnEfG</b>	Energieeffizienzgesetz
<b>ERC</b>	Ethereum Request for Comment
<b>ESG</b>	Environment, Social, Governance
<b>ETH</b>	Ethereum
<b>EU-ETS</b>	Europäischer Emissionshandel
<b>EUR</b>	Euro
<b>EUV</b>	Vertrag über die Europäische Union
<b>EVM</b>	Ethereum Virtual Machine
<b>EVU</b>	Energieversorgungsunternehmen
<b>EWG</b>	Erwägungsgrund
<b>eWpG</b>	Elektronisches Wertpapiergesetz
<b>f.</b>	folgend
<b>ff.</b>	folgende
<b>FG</b>	Finanzgericht
<b>Fn.</b>	Fußnote
<b>FPGA</b>	Field Programmable Gate-Array
<b>GCC</b>	Green-Cloud Computing
<b>Gem.</b>	gemäß
<b>GG</b>	Grundgesetz
<b>GHG</b>	Treibhausgas (green-house gas)
<b>GPU</b>	Graphic Processing Unit
<b>GRCh</b>	EU-Grundrechtecharta
<b>GW</b>	Gigawatt
<b>GWP</b>	Global Warming Potential / Treibhausgaspotenzial
<b>HAT</b>	Hardware Attached on Top
<b>ICO</b>	Initial Coin Offering
<b>IEA</b>	International Energy Agency
<b>i. E.</b>	Im Erscheinen
<b>i. Erg.</b>	Im Ergebnis
<b>IES</b>	Integriertes Energiesystem
<b>i. H. v.</b>	In Höhe von
<b>IKT</b>	Informations- und Kommunikationstechnologie
<b>Insb.</b>	insbesondere
<b>IoT</b>	Internet-of-things
<b>IP</b>	Internetprotokoll
<b>IPO</b>	Initial Public Offering (Börseneinführung)

<b>aA</b>	andere Ansicht
<b>iSd</b>	im Sinne des
<b>ISO</b>	Internationale Organisation für Normung
<b>IT</b>	Informationstechnologie
<b>i. V. m.</b>	In Verbindung mit
<b>Jdf.</b>	jedenfalls
<b>Jur. Person</b>	Juristische Person
<b>KAGB</b>	Kapitalanlagegesetzbuch
<b>Kap.</b>	Kapitel
<b>KEA</b>	Kumulierter Energieaufwand
<b>KfZ</b>	Kraftfahrzeug
<b>KMU</b>	Klein, mittel Unternehmen
<b>KPI4DCE</b>	Key Performance Indicators for Data Center Efficiency
<b>KryptoFAG</b>	Kryptofondsanteilsgesetz
<b>KSA</b>	Kumulierter Stromaufwand
<b>kWh</b>	Kilowatt-Stunde
<b>LCA</b>	Life-Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse)
<b>LCIA</b>	Life-Cycle Impact Analysis (Ökobilanzbewertung)
<b>LCI</b>	Lebenszyklusinventar
<b>MiCA</b>	Markets in Crypto-Assets
<b>MiFID-II-RL</b>	Richtlinie über Märkte für Finanzinstrumente sowie zur Änderung der Richtlinien 2002/92/EG und 2011/61/EU
<b>MJ</b>	Megajoule
<b>MMR</b>	Zeitschrift für IT-Recht und Recht der Digitalisierung
<b>MWh</b>	Megawatt-Stunde
<b>m. w. N.</b>	Mit weiteren Nachweisen
<b>Nat. Person</b>	Natürliche Person
<b>NJW</b>	Neue Juristische Wochenschrift
<b>NJW-RR</b>	Neue Juristische Wochenschrift-Rechtsprechungs-Report
<b>Nr.</b>	Nummer
<b>NVwZ</b>	Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht
<b>P2P</b>	Peer-to-peer
<b>PCB-Fläche</b>	Printed Circuit Board (Leiterplatte) - Fläche
<b>PEF</b>	Product Environmental Footprint
<b>POA</b>	Proof-of-Authority
<b>POS</b>	Proof-of-Stake
<b>POW</b>	Proof-of-Work
<b>PUE</b>	Power Usage Effectiveness
<b>RZ</b>	Rechenzentren

<b>aA</b>	andere Ansicht
<b>Rn.</b>	Randnummer
<b>Rspr.</b>	Rechtsprechung
<b>S.</b>	Seite oder Satz
<b>s.</b>	siehe
<b>sog.</b>	sogenannt
<b>Spezial-AIF</b>	Spezial-Alternative Investmentfonds
<b>St. Rspr.</b>	Ständige Rechtsprechung
<b>SWOT-Analyse</b>	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats - Analyse
<b>TFCFD</b>	Task Force on Climate-Related Financial Disclosures
<b>TH/s</b>	Terahash pro Sekunde
<b>tps</b>	Transaktionen pro Sekunde
<b>tx</b>	Transaktion
<b>u.a.</b>	unter Anderem
<b>UCL</b>	University College London
<b>Urt.</b>	Urteil
<b>USD</b>	US-Dollar
<b>UVP</b>	Umweltverträglichkeitsprüfung
<b>UVPG</b>	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
<b>UVP-RL</b>	Richtlinie 2011/92/EU des Europäischen Parlaments und des Rates v. 13.12.2011 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten
<b>v.</b>	vom
<b>versch.</b>	verschieden
<b>vgl.</b>	vergleiche
<b>VO</b>	Verordnung
<b>VPN</b>	Virtual Private Network
<b>WEF</b>	Weltwirtschaftsforum
<b>WpIG</b>	Wertpapierinstitutsgesetz
<b>ZAG</b>	Zahlungsdiensteaufsichtsgesetz
<b>z.B.</b>	zum Beispiel
<b>ZPO</b>	Zivilprozessordnung
<b>Zshg.</b>	Zusammenhang
<b>UBA</b>	Umweltbundesamt

## Zusammenfassung

Die Distributed Ledger Technologie bzw. Blockchain im Besonderen wird als zukunftsweisende und innovative Technologie mit einer Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten angesehen. Sie findet primär im Finanzsektor Anwendung, da sie den Austausch von Werten ohne Intermediär ermöglicht. In anderen Bereichen konnte sie sich bislang nicht in gleichem Ausmaß durchsetzen. Je nach Ausgestaltung gehen Blockchain-Anwendungsfälle mit erheblichem Ressourcen- und Energiebedarf einher und können damit Umwelt- und Klimaschäden verursachen. Aus diesem Grund hat sich dieses Projekt mit den Umweltauswirkungen von Blockchain-Anwendungsfällen befasst.

Das vorliegende Projekt verfolgte zwei Hauptziele: Erstens soll der Ressourcen- und Energiebedarf von Blockchain-Anwendungsfällen in einer strukturierten und vergleichbaren Form ermittelt werden, um ein grundlegendes Verständnis ihrer Umweltauswirkungen zu entwickeln. Zweitens sollen mögliche regulatorische Rahmenbedingungen für umweltfreundliche Blockchain-Lösungen diskutiert werden.

Im ersten Teil der Studie wurden zu diesem Zweck die Grundlagen geschaffen, um ein Modell zur Messung der Umweltauswirkungen der Blockchain zu entwickeln. Dieses Modell wurde dazu verwendet, um vier Anwendungsfälle mittels eines Life-Cycle-Assessment zu evaluieren und mit alternativen Anwendungen zu vergleichen. Im zweiten Teil wurden bestehende Regulierungen analysiert und mögliche alternative Regulierungsansätze diskutiert.

Die einzelnen Aufgaben im Rahmen dieser beiden Studienteile sind in der nachfolgenden Textbox aufgelistet.

### Arbeitspakete (AP) und deren Inhalte

#### AP I: Ermittlung der Ressourcen- und Energieaufwände von DLT-Anwendungsfällen

- ▶ Literaturrecherche über die Ergebnisse früherer UBA-Forschungsprojekte sowie über bestehende Methoden und Datensätze
- ▶ Auswahl von DLT-Anwendungsfällen und deren Alternativen
- ▶ Entwicklung und Auswahl einer geeigneten Methode und Datenbeschaffung
- ▶ Durchführung der Umweltbewertung für verschiedene Anwendungen

#### AP II: Regulatorische Herausforderungen und Anforderungen für den Einsatz von Blockchains

- ▶ Überblick über zivilrechtliche und datenschutzrechtliche Herausforderungen für den Einsatz von Blockchain-basierten Smart Contracts
- ▶ Identifikation relevanter Gesetze und Regelungen im deutschen und europäischen Recht
- ▶ Analyse des regulatorischen Rahmens auf Anreize für einen nachhaltigen Einsatz von Blockchain
- ▶ Herleitung von Handlungsempfehlungen für den Einsatz von DLT-Lösungen im Umweltschutz

## **DLT-Lösungen in praktischen Anwendungsfällen**

In einem ersten Schritt wurden bestehende Informationen zu den Umweltwirkungen von Blockchain-Anwendungsfälle einer Analyse unterzogen. Dabei konnten zahlreiche bereits existierende Berechnungen identifiziert werden.

Diese Analyse zeigte einerseits, dass aufgrund des dezentralen Charakters von Blockchains keine exakten Daten vorliegen. So kann beispielsweise die genaue Hardwareverteilung innerhalb einer Blockchain nur geschätzt, aber nicht präzise erfasst werden. Dies beeinflusst die Ergebnisse der Umweltbewertungen und führt je nach Annahmen zu unterschiedlichen Resultaten.

Andererseits zeigte sich, dass sich viele dieser Berechnungen lediglich auf Teilaspekte wie etwa die Nutzungsphase beziehen. Die bestehenden Berechnungen erfassen daher nicht alle relevanten Umweltwirkungen.

Um die Fragestellung einzugrenzen, wurde in einem nächsten Schritt ein Workshop mit Experten und Expertinnen des Umweltbundesamtes durchgeführt. Ziel war es, konkrete Anwendungsfälle für die vorliegende Studie auszuwählen. Die wichtigsten Auswahlkriterien dafür waren Relevanz, wobei die aktuelle und zukünftige Bedeutung der Anwendungsfälle berücksichtigt wurde, sowie Ausgewogenheit, die sowohl positive als auch negative Beispiele und Aspekte einbezieht. Zudem wurde auf eine technologische Vielfalt geachtet.

Basierend auf diesen Kriterien wurden Bitcoin, Ethereum, das Quartierstromprojekt als dezentralisierter Energiemarkt und der dezentrale Handel mit Green Bonds als relevante Anwendungsfälle ausgewählt. Im Austausch mit der Begleitgruppe haben wir uns anschließend auf die folgenden Vergleiche geeinigt:

- ▶ **Bitcoin als Transaktionsnetzwerk vs. PayPal**, das ähnliche Dienste ohne den Einsatz von DLT erbringt.
- ▶ **Ethereum als Plattform für dezentrale Anwendungen vs. eine Cloud-Computing-Lösung** und vs. **PayPal**.
- ▶ Ein auf einer **privaten Blockchain-basierender P2P-Energiemarkt vs. ein zentral organisierter Energiemarkt**.
- ▶ Ein **dezentral gehandelter Green Bond vs. eine Handelstätigkeit an einer zentralen Börse**.

## **Ein dynamisches Modell zur Berechnung der Umweltwirkungen**

Auf Basis der Literaturrecherche wurde ein geeignetes Modell zur Umweltbewertung der ausgewählten Anwendungsfälle und ihrer nicht-blockchainbasierten Alternativen entwickelt. Dabei sollte das Modell nicht nur die Nutzungsphase, sondern auch die Herstellungsphase der Anwendungsfälle berücksichtigen, da vermutet wird, dass letztere ebenfalls erhebliche Ressourcenaufwände erfordert.

Als Grundlage wurde deshalb die Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, LCA) als zielführende Methode identifiziert. Diese Methode ermöglicht die Quantifizierung der Umweltwirkungen eines Produkts oder einer Dienstleistung über den gesamten Lebenszyklus hinweg, von der Rohstoffgewinnung und Produktion (Herstellungsphase) über die Nutzung des Produkts bzw. der Dienstleistung (Nutzungsphase) bis zur Entsorgung (Entsorgungsphase).

Um die Umweltwirkungen in der Herstellungsphase zu schätzen, wurden frühere Erkenntnisse des Umweltbundesamtes aus den Studien Key Performance Indicators for Data Center Efficiency (KPI4DCE), (UBA 2018) und Green Cloud Computing (UBA 2021) herangezogen. Für die Modellierung der Nutzungsphase von Blockchains kamen die Methoden der University of

Cambridge (CCAF 2023b) und des Crypto Carbon Ratings Institute (CCRI 2022) zum Einsatz, wobei das Blockchain-Netzwerk jeweils Bottom-Up ermittelt wurde. Zudem wurde das Gewicht des durch Bitcoin erzeugten Elektroschrotts geschätzt, um ein Verständnis für die Entsorgungsphase zu gewinnen.

Um ein umfassendes Bild zu erhalten, wurden verschiedene Umweltwirkungen betrachtet. In Anlehnung an frühere Studien des UBA wurden für die Anwendungsfälle und die verschiedenen Phasen der Ökobilanzierung folgende Key Performance Indicators (KPIs) berechnet und dargestellt:

- ▶ **Rohstoffaufwand (ADP):** Dieser KPI bewertet die Inanspruchnahme von Mineralien und fossilen Rohstoffen. Die Einheit ist kg Antimon Äquivalente pro Jahr [kg Sb eq./a].
- ▶ **Kumulierter Stromaufwand (KSA):** Dieser KPI misst den für die Nutzung relevanten jährlichen Stromverbrauch, der von den Geräten benötigt wird. Die Maßeinheit ist Gigawattstunden pro Jahr [GWh/a].
- ▶ **Kumulierter Primärenergieaufwand (KEA):** Dieser KPI bewertet den Primärverbrauch an energetischen Ressourcen. Die Einheit ist Megajoule pro Jahr [MJ/a].
- ▶ **Treibhausgasemissionen (GWP):** Dieser KPI bewertet die Wirkung auf die Erderwärmung. Die Einheit ist kg Kohlendioxid Äquivalente pro Jahr [kg CO<sub>2</sub> eq./a].

Das Modell berechnet somit Kennzahlen zum Energieaufwand, zu den Treibhausgasemissionen sowie den Rohstoffaufwänden für Proof-of-Work- und Proof-of-Stake-Blockchains. Es basiert auf einer Kombination etablierter Berechnungen zur Ermittlung des Energieaufwands in der Nutzungsphase mit der bestehenden Methodik des UBA zur Ermittlung der Auswirkungen der Herstellungsphase aus früheren Projekten über Rechenzentren und Cloud Computing. Das Modell ist dynamisch aufgebaut und kann auf verschiedene Proof-of-Work- und Proof-of-Stake-Blockchains angewandt werden, da es Bottom-up auf der Spezifikation der Hardware, der Software und der Größe einer Blockchain basiert.

### Ergebnisse der Analyse der vier Anwendungsfälle

Der erste analysierte Anwendungsfall, **Bitcoin**, verwendet einen Proof-of-Work-Konsensmechanismus und wird als dezentrales Zahlungs- und Wertübertragungssystem genutzt. Die Bewertung erfolgte sowohl für das gesamte Netzwerk als auch pro Transaktion. Schließlich wurde ein Vergleich mit PayPal durchgeführt. Für letzteres wurden Werte aus ihrem GRI-Bericht entnommen. Die Ergebnisse der Schätzungen sind in Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1: Ergebnisse der quantitativen Bewertung von POW-Blockchains und Bitcoin**

	ADP (kg Sb eq./a)	KSA (kWh/a)	KEA (MJ/a)	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq./a)
Herstellungsphase	159.496	NA	21.101.207.611	1.530.554.519
Nutzungsphase	0	144.386.484.828	1.544.935.387.656	73.162.272.346
<b>Total</b>	<b>138.078</b>	<b>144.386.484.828</b>	<b>1.566.036.595.267</b>	<b>74.692.826.865</b>
<b>Pro Transaktion</b>	<b>0,001</b>	<b>940</b>	<b>10.192</b>	<b>486</b>
<b>Pro Transaktion (PayPal; GRI)</b>	<b>NA</b>	<b>0,01</b>	<b>NA</b>	<b>0,02</b>

Quelle: Eigene Berechnung.

Hinweis: Daten Paypal basierend auf eigenen Angaben. Für ADP und KEA sind keine Werte ausgewiesen.

Das Modell zeigt, dass der Konsensmechanismus von Bitcoin (Proof-of-Work) einen sehr hohen Energie- und Ressourcenbedarf hat. Dies im Vergleich zu anderen Blockchain-Lösungen (vgl. Tabelle 2), aber auch im Vergleich zu traditionellen Zahlungslösungen wie PayPal. Für den hohen Bedarf an Umweltressourcen ist relativ betrachtet vor allem die Nutzungsphase verantwortlich, da Bitcoin zur Bereitstellung der Sicherheit sehr viel Energie benötigt: Eine Transaktion über Bitcoin benötigt über tausendmal mehr Energie als eine Transaktion über PayPal.

Der zweite Anwendungsfall, **Ethereum, benötigt deutlich weniger Ressourcen**. Ethereum dient ebenfalls als Zahlungsplattform, wird aber auch für den Transfer von Wertpapieren und die Ausführung von Smart Contracts verwendet. Dieser Anwendungsfall basiert auf dem Proof-of-Stake-Konzept, das Einlagen als Sicherheit verwendet. Die Ergebnisse dieses Anwendungsfalles sind wiederum sowohl für das gesamte Netzwerk als auch pro Transaktion ausgewiesen. Zudem wurde ein Vergleich mit einer Cloud-Lösung (Single Node) durchgeführt. Die Resultate sind in Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2: Ergebnisse der quantitativen Bewertung von POS-Blockchains und Ethereum**

	ADP (kg Sb eq./a)	KSA (kWh/a)	KEA (MJ/a)	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq./a)
Herstellungsphase	294	NA	28.802.602	2.145.835
Nutzungsphase	0	7.026.245	75.180.824	2.561.511
<b>Total</b>	<b>294</b>	<b>7.026.245</b>	<b>103.983.425</b>	<b>4.707.346</b>
<b>Pro Transaktion</b>	<b>0,0000002</b>	<b>0,004</b>	<b>0,06</b>	<b>0,003</b>
<b>Pro Transaktion (Single Node)</b>	<b>1,2·10<sup>-11</sup></b>	<b>2,9·10<sup>-7</sup></b>	<b>4,4·10<sup>-6</sup></b>	<b>2,0·10<sup>-7</sup></b>

Quelle: Eigene Berechnung.

Aus den Ergebnissen wird vor allem ersichtlich, dass Ethereum deutlich weniger Energie als Bitcoin benötigt (vgl. auch Tabelle 1). Allerdings enthält auch Ethereum aufgrund seiner Dezentralität viele Redundanzen und eignet sich aufgrund seines Designs nicht für reine Rechenoperationen, wie der Vergleich mit einer Cloud-Lösung (Single Node) zeigt.

Der Vergleich mit PayPal hebt jedoch auch die Vorteile bei spezifischen Anwendungen hervor. Da Ethereum Zahlungen und Wertschriften ohne Intermediäre abwickelt, kann diese Blockchain gegenüber herkömmlichen Lösungen aus Umweltsicht durchaus vorteilhaft sein – vorausgesetzt, sie ersetzt diese ganz oder teilweise.

Die Umweltwirkung hängt zudem davon ab, wie Rechenoperationen und Transaktionen auf Ethereum durchgeführt werden. Die diskutierten Ergebnisse beziehen sich auf die Haupt-Blockchain von Ethereum, den sog. „Layer 1“. Im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen ist somit zu beachten, dass die vorgenommene Umweltbewertung den aktuellen Stand der Blockchain-Technologien widerspiegelt. Es gibt Bestrebungen, die Effizienz der Blockchain zu erhöhen (sogenannte „Layer 2-Lösungen“). Im Rahmen des dritten Anwendungsfalles werden **P2P-Märkte** untersucht, die mittels Blockchain-Technologie implementiert werden. Die Resultate für diesen Anwendungsfall sind in Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3: Ergebnisse der quantitativen Bewertung von lokalen Energiemärkten**

	ADP (kg Sb eq./a)	KSA (kWh/a)	KEA (MJ/a)	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq./a)
Herstellungsphase	0,77	N/A	50.470	3.486
Nutzungsphase	0,00	1.168	12.494	64
<b>Total</b>	<b>0,77</b>	<b>1.168</b>	<b>62.964</b>	<b>3.550</b>
<b>Pro Transaktion</b>	<b>0,0000000023</b>	<b>0,0000035</b>	<b>0,00019</b>	<b>0,000011</b>
<b>Pro Transaktion (Produktion Deutschland)</b>	<b>0,0000000023</b>	<b>0,0000035</b>	<b>0,00019</b>	<b>0,000012</b>

Quelle: Eigene Berechnung.

Das Beispiel „Quartierstrom“ (Tabelle 3) zeigt im Vergleich zu Ethereum (vgl. Tabelle 2), dass eine private Blockchain generell weniger Umweltressourcen benötigt als eine öffentliche Blockchain. Die geringeren Umweltauswirkungen sind hauptsächlich auf die kleine Netzwerkgröße und den Einsatz einfacher Hardware (wie etwa dem Raspberry Pi) zurückzuführen. Der Vergleich mit einer Single Node (vgl. Tabelle 2) zeigt jedoch auch, dass zentrale Lösungen eine bessere Performance aufweisen, insbesondere da auch private Blockchains mit Redundanzen arbeiten. Die Unterschiede sind allerdings geringer als bei öffentlichen Blockchains.

Schließlich wurde ein Anwendungsfall im Bereich **Green Bonds** analysiert. Hierbei wurde insbesondere der Handel auf Sekundärmärkten auf Basis der Ethereum-Blockchain (Proof-of-Stake) betrachtet. Digitale Green Bonds bergen das Potenzial, vermehrt Investitionen in den Ausbau von erneuerbaren Energien anzuziehen. Studien heben hierbei die Vorteile der Blockchain hervor, insbesondere die erhöhte Transparenz, die zu mehr Vertrauen und Investitionen führt. Die Resultate dieses Anwendungsfalles sind in Tabelle 4 dargestellt.

**Tabelle 4: Ergebnisse der quantitativen Bewertung von Green Bonds**

	ADP (kg Sb eq.)	KSA (kWh/a)	KEA (MJ/a)	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq./a)
I: Umweltwirkung pro Ethereum-Recheneinheit	$7,5 \cdot 10^{-12}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$
II: Anzahl Ethereum-Recheneinheiten pro Transaktion <sup>1</sup>	170.000	170.000	170.000	170.000
<b>III: Umweltwirkung pro Transaktion (I*II)</b>	<b>0,000001</b>	<b>0,03</b>	<b>0,45</b>	<b>0,02</b>

Quelle: Eigene Berechnung.

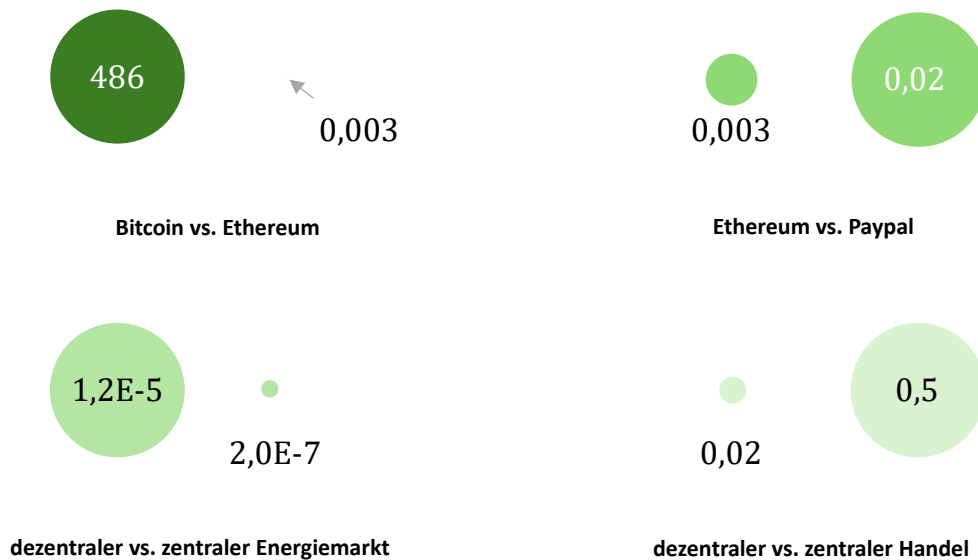
Die Berechnungen des entwickelten Modells zeigen, dass der Einsatz von Blockchain für den Handel von Green Bonds effizient sein kann. Die in Tabelle 4 ausgewiesenen Kennzahlen sind niedriger als die beispielhaft für den Handel an der Schweizer Börse ermittelten Werte (Gesamte Treibhausgasemissionen geteilt durch Gesamtanzahl Transaktionen der Schweiz Börse: 0,5 kg CO<sub>2</sub> eq./a). Die Unterschiede ergeben sich primär durch den Betrieb der Infrastruktur der

<sup>1</sup> Ein getätigter Handel auf Uniswap kostet ca. 170.000 Ethereum-Gas Einheiten.

Schweizer Börse. Die beschriebenen positiven Effekte werden somit nicht durch die benötigten Umweltressourcen der Blockchain aufgewogen.

Die wichtigsten Resultate für die Treibhausgasemissionen sind in Abbildung 1 illustriert.

**Abbildung 1: Vergleich der Treibhausgasemissionen in kg CO<sub>2</sub> eq./a je Transaktion**



Quelle: Eigene Darstellung (vgl. Tabelle 1 bis 4).

Die vier Anwendungsfälle und deren Vergleiche illustrieren die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Verbrauch von Umweltressourcen: Konsensmechanismus und redundante Berechnungen. Blockchains, die für den Konsensmechanismus Energie als Sicherheit verwenden, schneiden hinsichtlich der Umweltauswirkungen deutlich schlechter ab als zentralisierte Lösungen. Dagegen können Blockchain-Lösungen, die auf anderen Konsensmechanismen als Proof-of-Work basieren, trotz redundanter Berechnungen eine bessere Umweltbilanz aufweisen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn sie traditionelle Finanzdienstleistungen oder zumindest Teile davon ersetzen.

Hinsichtlich der Berechnungen ist zu berücksichtigen, dass die **Analyse auf Schätzungen basiert** da die Blockchain dezentral organisiert ist. Die Ergebnisse sind daher als Tendenzen zu interpretieren. Das Modell berücksichtigt zwar verschiedene Faktoren, stößt jedoch insbesondere bei der präzisen Abschätzung des verwendeten Energiemixes sowie der exakten Definition der verwendeten Hardware und Software an seine Grenzen. Trotz dieser Limiten lassen sich jedoch robuste Aussagen treffen. Insbesondere zeigt sich, dass Bitcoin für Transaktionen mit hohen Umweltauswirkungen verbunden ist.

Staatliche Stellen sind verfassungsrechtlich verpflichtet durch gesetzgeberische Maßnahmen eine Transformation zu nachhaltiger Wirtschaft anzustoßen und regulatorische Maßnahmen zu ergreifen, um negative Umweltwirkungen abzumildern. Entsprechende Maßnahmen zur Regulierung von Blockchains wurden im zweiten Teil der Studie diskutiert. Die Blockchain kann möglicherweise auch einen Beitrag zur Lösung von Umweltproblemen leisten. Deshalb wurde vorab auf die zivil- und datenschutzrechtlichen Herausforderungen von Blockchain-basierten Smart Contracts eingegangen.

### **Zivilrechtliche Anforderungen an die Ausgestaltung von Smart Contracts**

Ausgehend von der Anwendbarkeit des deutschen Zivilrechts wurden zwei Anwendungskonstellationen von Smart Contracts auf ihre zivilrechtlichen Anforderungen untersucht:

- ▶ der Einsatz von Smart Contracts beim Abschluss von Verträgen und
- ▶ der Einsatz von Smart Contracts zur automatisierten Durchführung von Verträgen.

Hierzu wurde die rechtswissenschaftliche Literatur ausgewertet und darauf aufbauend verschiedene Herausforderungen beim Einsatz von Smart Contracts identifiziert und überblicksweise diskutiert.

Smart Contracts sind grundsätzlich keine Verträge im Rechtssinne, sondern Computerprogramme. Damit ein Vertrag im Rechtssinne vorliegen und der Smart Contract rechtliche Wirkungen erzeugen kann, müssen die tatsächlichen Vorgänge des Computerprogramms rechtliche Voraussetzungen für den Vertragsschluss erfüllen. Soll ein Smart Contract der Durchsetzung von Verträgen dienen, so müssen sich die im Programm niedergelegten Vorgänge an die rechtlich zwingenden Voraussetzungen für die Vertragsdurchführung halten.

Grundlegende zivilrechtliche Bedenken stehen dem Einsatz von Smart Contracts im Rechtsverkehr nicht entgegen. Smart Contracts können beim Vertragsschluss Anwendung finden, solange keine strengere Form als die Textform (Art. 126b BGB) verlangt wird. Bei der Vertragsdurchführung besteht grundsätzlich Vertragsfreiheit (Art. 2 Abs. 1 GG), sodass die Parteien in den Grenzen des zwingenden Rechts beliebig den Einsatz von Smart Contracts regeln können. Schwierigkeiten können sich hier vor allen Dingen bei Selbstdurchsetzungsklauseln, Preisanpassungsklauseln und der Rückabwicklung rechtsunwirksamer Transaktionen ergeben.

Blockchain-Anwendungen fallen in der Regel in den Anwendungsbereich der DS-GVO und müssen daher datenschutzrechtliche Anforderungen erfüllen. Insgesamt zeigt sich jedoch eine begrenzte praktische Vereinbarkeit der DS-GVO mit dezentralen Datenverarbeitungsmodellen. So wurde die DS-GVO für zentrale Datenverarbeitungsmodelle entwickelt und führt daher zu zahlreichen Konflikten zwischen der Blockchain und dem Datenschutz. Überall dort, wo eine nachträgliche Veränderung der Daten gefordert wird, kommen Blockchains aufgrund der Unveränderlichkeit der Inhalte an die Grenzen der technischen Umsetzbarkeit einer Durchsetzung der Betroffenenrechte. Permissionless Blockchains sind daher regelmäßig als datenschutzwidrig einzustufen, sofern diese schützenswerte Personendaten beinhalten. Durch die Gestaltung der Blockchain als permissioned Blockchains können die datenschutzrechtlichen Konflikte abgemildert oder gar überwunden werden. Zu bedenken ist allerdings, dass solche permissioned Blockchains häufig mit Nachteilen im Hinblick auf die Sicherheitsarchitektur verbunden sind und zahlreiche Vorteile der Blockchain-Technologie verloren gehen.

### **Analyse des bestehenden regulatorischen Rahmens von Blockchain**

Als Ausgangspunkt für die Entwicklung von Empfehlungen für die Anpassung des regulatorischen Rahmens, wurde der bestehende Rahmen umrissen und überblicksweise dargestellt. Der Schwerpunkt der Darstellung konzentriert sich dabei auf die Regulierung von Kryptowerte und dabei vor allen Dingen auf die rechtlichen Rahmenbedingungen durch

- ▶ die deutsche und europäische Finanzmarktregulierung,
- ▶ die Geldwäscheregulierung und
- ▶ das Steuerrecht.

Ausgehend von diesem Rechtsrahmen wurden ausgewählte Rechtsnormen auf ihre Anreizwirkung für den nachhaltigen Einsatz von Blockchains analysiert. Dabei beschränkt sich die Analyse auf Rechtsnormen, bei denen aus unserer Sicht ein Potenzial zur Beeinflussung des nachhaltigkeitsbezogenen Verhaltens der Akteure bestand. Entweder weil sich die Normen unmittelbar mit den klima- und umweltbezogenen Auswirkungen von Blockchain beschäftigen oder weil sie sich mittelbar auf das Nutzungsverhalten der Akteure auswirken können. Daneben wurden auch andere Rechtsnormen berücksichtigt, die nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Regulierung von Blockchains stehen, aber zumindest mittelbar einen Einfluss auf den nachhaltigen Einsatz von Blockchains haben können. Aus diesen ausgewählten rechtlichen Vorgaben wurden dann Anreize für das Verhalten eines rational handelnden Akteurs identifiziert. Diese Anreize wurden auf ihre Umweltwirkungen analysiert und bewertet. Die Analyse der Umweltwirkungen greift dabei verschiedene Nachhaltigkeitsaspekte auf, die auch bereits in AP I diskutiert wurden. Im Einzelnen wurden folgende Rechtsvorschriften analysiert:

- ▶ Whitepaper-Pflicht in der MiCA-VO,
- ▶ Steuerermindernder Werbungskostenabzug für Energieaufwände,
- ▶ einjährige Spekulationsfrist für Kryptotoken,
- ▶ Förderbedingungen für Blockchain-Projekte,
- ▶ Treibhausgasemissionszertifikatehandel gem. EU-ETS und
- ▶ Energieeffizienzgesetz.

Die Analyse des derzeitigen Rechtsrahmens ergibt, dass die negativen Umweltwirkungen von Blockchains im regulatorischen Rahmen in Deutschland zwar erfasst sind, jedoch nur unzureichend. Beim Einsatz von Blockchain kann es aufgrund der fehlenden Internalisierung von externen Effekten auf die Umwelt und aufgrund von Informationsasymmetrien zwischen den Marktakteuren zu Marktversagen kommen, was entsprechende Markteingriffe rechtfertigt.

Zwar besteht mit dem EU-ETS eine Maßnahme, die versucht das identifizierte Marktversagen zu vermindern. Von dieser Maßnahme betroffen sind jedoch nur Mining-Aktivitäten innerhalb der EU. Findet das Mining außerhalb Europas statt, so greift diese Regelung, wie bei anderen digitalen Angeboten, nicht. Die Erhöhung der Energiepreise aufgrund des EU-ETS innerhalb der EU können deshalb zu einer Verlagerung des Mining ins Ausland führen und somit die Regulierung aushebeln („Carbon Leakage“).

#### **Entwicklung von Empfehlungen für eine Anpassung des regulatorischen Rahmens**

Ausgehend von diesem regulatorischen Defizit wurden Maßnahmen sowie deren Vor- und Nachteile diskutiert. Hierzu wurden Vorschläge aus Literatur und Politik aufgegriffen verschiedene Maßnahmen identifiziert, die zum Ziel haben, das Marktversagen zu reduzieren. Eine Übersicht dieser Maßnahmen ist in Tabelle 5 dargestellt.

**Tabelle 5: Kategorisierung der Regulierungsmaßnahmen**

Ordnungsrechtliche Instrumente	Informatorische Instrumente	Freiwillige Vereinbarungen	Ökonomische Instrumente
Verbot von Mining	Umwetlabel für Blockchains	Selbstverpflichtungen von Unternehmen	Importzölle/Abgaben/ Subventionen bei der Erneuerung der Hardware
Verbot von Handel, Besitz und Dienstleistungen im Zusammenhang mit POW- basierten Kryptowerten	-	-	Beihilfen für Forschung und Entwicklung
Umweltverträglichkeits- prüfung für Mining Farmen (UVP)	Informationskampag- ne über den Energieaufwand neuer Technologien	-	Transaktionssteuer für Kryptowerte  Verlängerung der Spek- ulationsfrist auf zehn Jahre
			Cap-and-Trade System

Quelle: Eigene Darstellung / Hellgrün – Auswirkungen auf den Betrieb der Blockchain, Grau – Auswirkungen auf den Handel der Kryptowerte.

Die identifizierten Maßnahmen wurden hinsichtlich ihrer Anreize und Umweltwirkungen analysiert sowie ihre Vor- und Nachteile anhand der folgenden Kriterien diskutiert:

- ▶ **Wirksamkeit: Beschreibt die Fähigkeit der** Maßnahme das Ziel, eine nachhaltigere Nutzung von Blockchain, zu erreichen und somit das Marktversagen zu reduzieren. Bei der Beurteilung der Wirksamkeit wird die Frage gestellt, inwieweit der Eingriffsmechanismus zur Zielerreichung beiträgt. Die Wirksamkeit betrachten wir sowohl auf EU-Ebene, wie auch im globalen Kontext, vorausgesetzt die Maßnahme wird auf EU-Ebene *umgesetzt*.
- ▶ **Effizienz:** Beschreibt die Kosten der Maßnahme im Vergleich zur Wirksamkeit. Wenn die Maßnahme bei minimalen Kosten und durch möglichst kleinen Marktverzerrungen ihre Wirksamkeit erzielt, ist die Maßnahme ökonomisch effizient. Bei den Kosten sind sowohl direkte Kosten, wie z.B. Aufwendungen für Subventionen, als auch indirekte Kosten, wie z.B. unerwünschte Marktverzerrungen, zu berücksichtigen.
- ▶ **Umsetzbarkeit:** Beschreibt inwieweit die Maßnahme hinsichtlich politischer, rechtlicher und praktischer Gesichtspunkte umsetzbar ist. Bei der Umsetzbarkeit fließen darüber hinaus auch der administrative Umsetzungs- und Durchsetzungsaufwand mit ein.

Die Analyse zeigte, dass eine wirksame Regulierung mit erheblichen Herausforderungen verbunden ist. Dabei stellen insbesondere die **Dezentralität, Internationalität und Pseudonymität** von Blockchains zentrale Herausforderungen dar. Häufig muss die Regulierung auf die Unterstützung durch zentrale (professionelle) Intermediäre zurückgreifen, um die Maßnahmen durchsetzen zu können. Solche Akteure sind bei permissionless Blockchains (Dezentralität) nicht zwingend vorhanden. Die Regulierung ist deshalb schwieriger durchzusetzen.

Als **First-Best Optionen** wurden Maßnahmen identifiziert, die direkt beim Ressourcenaufwand (Energie bzw. seltene Erden) ansetzen und dadurch zur direkten Internalisierung der externen Effekte führen, ohne weitere Marktverzerrungen zu verursachen. Eine solche Internalisierung

könnte theoretisch durch ein **globales Cap-and-Trade-System** erreicht werden. Der Regulator beschränkt sich hierbei auf die Festlegung der maximal zugelassenen globalen Umweltwirkung („Cap“). Die Internalisierung der externen Effekte bzw. die Anpassung an die Mengenbeschränkung wird den einzelnen Akteuren auf dem Markt überlassen („Trade“). Dadurch wird eine effiziente Allokation der Ressource Umwelt erzielt. Mit Ausnahme der Festlegung der Obergrenze setzt eine solche Maßnahme nur wenige Informationen bei der regulierenden Behörde voraus. Diese Maßnahme hat zudem den Vorteil, dass sie unerwünschte Nebenfolgen wie Verzerrungen auf angrenzenden Märkten verringert und entsprechend mit geringen ökonomischen Kosten verbunden ist.

Ein globales Cap-and-Trade-System dürfte jedoch aufgrund unterschiedlicher Interessen zwischen den Ländern schwierig umzusetzen sein. Entsprechend wurden ebenfalls Second-Best Maßnahmen diskutiert. Solche **Second-Best Maßnahmen** fokussieren aufgrund der schwierigen globalen Durchsetzbarkeit auf die **europäische bzw. deutsche Ebene**. Dabei ist keineswegs ausgeschlossen, dass von solchen Maßnahmen auch globale Signalwirkungen ausgehen können. Eine Maßnahme auf europäischer bzw. deutscher Ebene kann eine Vorbildwirkung für andere Staaten entfalten.

Als Adressaten der Second-Best Maßnahmen kommen auf der Angebotsseite die Miner und auf der Nachfrageseite die Anlegerinnen in Kryptowerte und Nutzer von Blockchains in Betracht. Anreize spielen eine zentrale Rolle, wenn es darum geht, wie Anlegerinnen und Anleger ihre Investitionen in Kryptowerte auswählen. Bei der Anlage in Kryptowerte werden Anlegerinnen teilweise durch Intermediäre wie Kryptobörsen unterstützt. Daher adressieren einige der diskutierten Maßnahmen Anlegerinnen und Intermediäre gleichermaßen. Änderungen im Nachfrageverhalten der Anlegerinnen und Nutzer können dann mittelbar auch das Angebot durch die Miner beeinflussen.

Die Analyse zeigt, dass **lokale angebotsbezogene Maßnahmen**, bei denen **die Miner** im Fokus stehen, aufgrund der Verlagerungsproblematik eine geringere unmittelbare globale Wirksamkeit aufweisen dürften als nachfragebezogene Maßnahmen. Zwar werden auch durch solche Maßnahmen die lokalen Umweltwirkungen (insbesondere Treibhausgasemissionen) reduziert, jedoch können diese durch substituierende Zuwächse in anderen Regionen ausgeglichen werden. Nur globale Maßnahmen können hier einen signifikanten globalen Effekt bewirken. Diese begrenzte Wirkung zeigt sich sowohl beim ordnungsrechtlichen Verbot des POW-Minings, bei der UVP-Pflicht für Miningfarmen, bei einem Cap-and-Trade-System als auch bei einer Steuer.

Eine größere (globale) Wirksamkeit versprechen **nachfragebezogene Maßnahmen, wobei bei diesen die Intermediäre im Fokus stehen**. Eine Verringerung der europäischen Nachfrage führt zu einer globalen Nachfrageverringering, die vermutlich nicht ohne Weiteres von ausländischen Akteuren kompensiert werden könnte. Daher ist die globale Wirksamkeit dieser Maßnahmen höher einzuschätzen. In diesem Zusammenhang werden im Bericht Verbote, Preismaßnahmen (z.B. Spekulationsfrist, Transaktionssteuer) und informatorische Maßnahmen (z.B. Umweltlabel, Informationskampagne) diskutiert.

Das **Verbot**, Proof-of-Work-Kryptowerte zu besitzen oder zu handeln (ob auf Handelsbörsen oder außerhalb), hätte in Bezug auf Deutschland bzw. die EU potenziell eine hohe Wirksamkeit, da der Zugang stark eingeschränkt würde und somit die Nachfrage in Deutschland bzw. der EU deutlich reduziert würde. Ein solches Verbot wäre zudem theoretisch einfach umzusetzen, da mit der MiCA-VO bereits ein Regulierungsframework für Kryptowerte existiert. Sofern das volkswirtschaftliche Optimum an Proof-of-Work-Mining jedoch größer als null ist, wäre eine solche Lösung aus ökonomischer Sicht ineffizient. Dies liegt daran, dass es nicht den Akteuren

überlassen würde, die Umweltwirkungen zu internalisieren und eigenständig nach Lösungen zu suchen.

Alternativ kommen auch lokale marktorientierte oder informatorische Maßnahmen in Betracht. Zu **den marktorientierten Maßnahmen** zählen vor allem Steuern oder ein Cap-and-Trade-System. Bei diesen Maßnahmetypen werden die Externalitäten internalisiert, indem sie mit einer Abgabe belegt werden. Eine Steuer ist hierbei schwieriger umzusetzen, da ex-ante unklar ist, wie stark die Akteure auf die Maßnahme reagieren werden. Bei einer Steuer müsste deshalb ggf. nachjustieren werden, um eine Lenkungswirkung zu erzielen. Einfacher ist es, der Branche eine Obergrenze für Emissionen vorzugeben, was grundsätzlich wiederum einem Cap-and-Trade-System gleichkäme. Offen bleibt hierbei die Frage, wie hoch die Emissionen für Kryptowerte sein dürfen und wie dies mit anderen (Finanz-)Dienstleistungen in Einklang steht.

Nicht zuletzt wurden auch **informatorische Maßnahmen** diskutiert. Auf europäischer Ebene wurde mit der Veröffentlichungspflicht für Informationen über die Umweltwirkung von Kryptowerten im Kryptowerte-Whitepaper nach der MiCA-VO bereits eine solche informatorische Maßnahme ergriffen. Mit dieser Maßnahme können Informationsasymmetrien abgebaut und Transparenz über die Umweltwirkungen einer Anlage in Kryptowerte für die Anleger geschaffen werden. Allerdings scheinen diese Informationen häufig zu komplex zu sein, um bei den Anlegern eine Verhaltensänderung anstoßen zu können. Sie wurden daher vorliegend zu einem Umweltlabel weiterentwickelt. Die Wirksamkeit des Umweltlabels hängt letztlich von der Sensibilität der Anlegenden ab. Nur wenn diese bereit sind, ihr Anlageverhalten zu ändern, kann die Maßnahme eine positive Umweltwirkung entfalten. Die Wirksamkeit ist deshalb mit erheblicher Unsicherheit behaftet. Gegen diese Maßnahmen sprechen die Kosten für die Umsetzung, insbesondere durch die Informationsbeschaffung für die zur Bereitstellung des Labels verpflichteten Akteure, sowie mögliche Missbrauchspotenziale.

Zusammenfassend zeigt sich, dass keine der vorgeschlagenen Maßnahmen, ebenso wenig wie der regulatorische Status quo, den Herausforderungen in Gänze gerecht wird. Letztlich hängt die Beurteilung konkreter Maßnahme immer davon ab, welchem Bewertungskriterium wie viel Gewicht zugesprochen wird. Für die Weiterentwicklung empfehlen wir eine vertiefte Kosten-Nutzen-Analyse der Maßnahmen, die gemäß den Bewertungskriterien besonderes hervorgehoben wurden.

## Summary

Distributed ledger technology, or blockchain in particular, is seen as an innovative technology with a wide range of potential applications. It is primarily used in the financial sector, as it enables the exchange of values without an intermediary. It has not yet been able to establish itself to the same extent in other areas. Depending on their design, blockchain use cases are associated with considerable resource and energy requirements and can therefore cause environmental and climate damage. For this reason, this project focussed on the environmental impact of blockchain use cases.

This project pursued two main objectives: First, to identify the resource and energy requirements of blockchain use cases in a structured and comparable way in order to develop a basic understanding of their environmental impact. Secondly, to discuss possible regulatory frameworks for environmentally friendly blockchain solutions.

To this end, the first part of the study laid the foundations for developing a model to measure the environmental impact of blockchain. This model was used to evaluate four use cases by means of a life cycle assessment and compared with alternative applications. In the second part, existing regulations were analysed and possible alternative regulatory approaches were discussed.

The individual tasks in these two parts of the study are listed in the text box below.

### Work packages (WP) and their contents

#### WP I: Determining the resource and energy costs of DLT use cases

- ▶ Literature research on the results of previous UBA research projects and on existing methods and data sets
- ▶ Selection of DLT use cases and their alternatives
- ▶ Development and selection of a suitable method and data procurement
- ▶ Carrying out the environmental assessment for various applications

#### AP II: Regulatory challenges and requirements for the use of blockchains

- ▶ Overview of civil law and data protection challenges for the use of blockchain-based smart contracts
- ▶ Identification of relevant laws and regulations in German and European law
- ▶ Analysing the regulatory framework for incentives for the sustainable use of blockchain
- ▶ Derivation of recommendations for the use of DLT solutions in environmental protection

### **DLT solutions in practical use cases**

In a first step, existing information on the environmental impact of blockchain use cases was analysed. Numerous existing calculations were identified.

On the one hand, this analysis showed that no exact data is available due to the decentralised nature of blockchains. For example, the exact hardware distribution within a blockchain can only be estimated, but not precisely recorded. This influences the results of the environmental assessments and leads to different results depending on the assumptions made. On the other hand, it has been shown that many of these calculations only relate to partial aspects such as the utilisation phase. The existing calculations therefore do not cover all relevant environmental impacts.

In order to narrow down the issue, the next step was to organise a workshop with experts from the Federal Environment Agency. The aim was to select specific use cases for this study. The most important selection criteria for this were relevance, whereby the current and future significance of the use cases was taken into account, as well as balance, which includes both positive and negative examples and aspects. Attention was also paid to technological diversity.

Based on these criteria, Bitcoin, Ethereum, the neighbourhood electricity project as a decentralised energy market and decentralised trading with green bonds were selected as relevant use cases. In dialogue with the steering group, we then agreed on the following comparisons:

- ▶ **Bitcoin as a transaction network vs. PayPal**
- ▶ **Ethereum as a platform for decentralised applications vs. a cloud computing solution and vs. PayPal.**
- ▶ **A P2P energy market based on a private blockchain vs. a centrally organised energy market.**
- ▶ **Trade a decentralised green bond vs. trading on a central exchange.**

### **A dynamic model for calculating the environmental impact**

Following a comprehensive review of the literature, a suitable model was developed for the environmental assessment of the selected use cases and their non-blockchain-based alternatives. The model was designed to consider not only the usage phase but also the manufacturing phase of the use cases, as it is assumed that the latter also requires significant resource expenditures.

Life cycle assessment (LCA) was therefore identified as the most effective method. This method enables the quantification of the environmental impact of a product or service over its entire life cycle, from the extraction of raw materials and production (production phase) through its use (usage phase) to its disposal (disposal phase). In order to estimate the environmental impact in the production phase, we applied previous findings of the German Environment Agency from the Key Performance Indicators for Data Centre Efficiency (KPI4DCE) (UBA 2018) and Green Cloud Computing (UBA 2021) studies. In addition, we employed the methods of the University of Cambridge (CCAF 2023b) and the Crypto Carbon Ratings Institute (CCRI 2022) to model the usage phase, with the blockchain network being determined bottom-up in each case.

Additionally, the weight of the electronic waste generated by Bitcoin was estimated in order to gain an understanding of the disposal phase. To obtain a comprehensive picture, various environmental impacts were analysed. Drawing upon the findings of earlier UBA studies, we

calculated and presented the following key performance indicators (KPIs) for the use cases and the various phases of the life cycle assessment:

- ▶ **Raw Material Demand (ADP):** This KPI assesses the consumption of minerals and fossil resources. The unit is kilograms of antimony equivalents per year [kg Sb eq./a].
- ▶ **Cumulative Electricity Demand (KSA):** This KPI measures the annual electricity consumption relevant to usage, required by the devices. The unit is gigawatt-hours per year [GWh/a].
- ▶ **Cumulative Primary Energy Demand (KEA):** This KPI evaluates the primary consumption of energy resources. The unit is megajoules per year [MJ/a].
- ▶ **Greenhouse Gas Emissions (GWP):** This KPI assesses the impact on global warming. The unit is kilograms of carbon dioxide equivalents per year [kg CO<sub>2</sub> eq./a]

The model thus calculates key figures on energy consumption, greenhouse gas emissions and raw material consumption for proof-of-work and proof-of-stake blockchains. It is based on a combination of established calculations for determining the energy consumption in the usage phase with the existing UBA methodology for determining the impact of the production phase from previous projects on data centres and cloud computing. The model is dynamically structured and can be applied to various proof-of-work and proof-of-stake blockchains, as it is based bottom-up on the specification of the hardware, software and size of a blockchain.

#### Results of the analysis of the four use cases

The first use case analysed, **Bitcoin**, uses a proof-of-work consensus mechanism and is used as a decentralised payment and value transfer system. The evaluation was carried out both for the entire network and per transaction. Finally, a comparison was made with PayPal. For the latter, we used values from their GRI report. The results of the estimates are shown in Table 1.

**Table 1: Results of the quantitative evaluation of POW blockchains and Bitcoin**

	ADP (kg Sb eq./a)	KSA (kWh/a)	KEA (MJ/a)	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq./a)
Production phase	159.496	NA	21.101.207.611	1.530.554.519
Usage phase	0	144.386.484.828	1.544.935.387.656	73.162.272.346
<b>Total</b>	<b>138.078</b>	<b>144.386.484.828</b>	<b>1.566.036.595.267</b>	<b>74.692.826.865</b>
<b>Per transaction</b>	<b>0,001</b>	<b>940</b>	<b>10.192</b>	<b>486</b>
<b>Per transaction (PayPal; GRI)</b>	<b>NA</b>	<b>0,01</b>	<b>NA</b>	<b>0,02</b>

Source: own calculations.

Note: The data for PayPal is based on its own disclosures. No values are provided for ADP and KEA.

The result shows that Bitcoin's consensus mechanism (proof-of-work) has a very high demand for environmental resources. This is in comparison to other blockchain solutions (see Table 2), but also in comparison to traditional payment solutions such as PayPal. In relative terms, the usage phase is the primary driver of Bitcoin's high demand for environmental resources, as it requires a substantial amount of energy to ensure security: As such a transaction via Bitcoin requires over a thousand times more energy than a transaction via PayPal.

The second use case, **Ethereum**, requires significantly fewer resources. Ethereum also serves as a payment platform but is also used for the transfer of securities and the execution of smart

contracts. This use case is based on the proof-of-stake concept, which uses deposits as collateral. The estimated environmental impact of this use case is presented for both the entire network and per transaction. In addition, a comparison was made with a cloud solution (single node). The estimates are presented in Table 2.

**Table 2: Results of the quantitative evaluation of POS blockchains and Ethereum**

	ADP (kg Sb eq./a)	KSA (kWh/a)	KEA (MJ/a)	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq./a)
Production phase	294	NA	28.802.602	2.145.835
Usage phase	0	7.026.245	75.180.824	2.561.511
<b>Total</b>	<b>294</b>	<b>7.026.245</b>	<b>103.983.425</b>	<b>4.707.346</b>
<b>Per transaction</b>	<b>0,0000002</b>	<b>0,004</b>	<b>0,06</b>	<b>0,003</b>
<b>Per transaction (single node)</b>	<b>1,2·10<sup>-11</sup></b>	<b>2,9·10<sup>-7</sup></b>	<b>4,4·10<sup>-6</sup></b>	<b>2,0·10<sup>-7</sup></b>

Source: own calculations.

According to the estimates Ethereum requires significantly less energy than Bitcoin (see also Table 1). However, Ethereum also contains many redundancies due to its decentralised nature and is therefore not suitable for pure computing operations (see cloud, i.e., single node results).

The comparison with PayPal emphasises the advantages for specific applications. As Ethereum processes payments and securities without intermediaries, this blockchain can also be advantageous compared to conventional solutions from an environmental perspective – provided that it replaces them in full or in part.

Note that the environmental impact also depends on how computing operations and transactions are carried out on Ethereum. The results discussed above relate to the main blockchain of Ethereum, the so-called „Layer 1“. With regard to future developments, it is important to note that the environmental assessment reflects the current state of blockchain technologies. There are ongoing efforts to improve blockchain efficiency, such as so-called “Layer 2 solutions.”

The third use case analyses energy **P2P markets** that are implemented using blockchain technology. The estimates for this use case are shown in Table 3.

**Table 3: Results of the quantitative evaluation of local energy markets**

	ADP (kg Sb eq./a)	KSA (kWh/a)	KEA (MJ/a)	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq./a)
Production phase	0,77	N/A	50.470	3.486
Usage phase	0,00	1.168	12.494	64
<b>Total</b>	<b>0,77</b>	<b>1.168</b>	<b>62.964</b>	<b>3.550</b>
<b>Per transaction</b>	<b>0,0000000023</b>	<b>0,0000035</b>	<b>0,00019</b>	<b>0,000011</b>
<b>Per transaction (production Germany)</b>	<b>0,0000000023</b>	<b>0,0000035</b>	<b>0,00019</b>	<b>0,000012</b>

Source: own calculations.

Compared to Ethereum (see Table 2), the „Quartierstrom“ example (see Table 3) shows that a private blockchain generally requires fewer environmental resources than a public blockchain. The lower environmental impact is mainly due to the small network size and the use of simple hardware (such as the Raspberry Pi). However, the comparison with a single node (see Table 2) also shows that in general centralised solutions have better performance, as private blockchains also work with redundancies. Note, the differences are smaller than with public blockchains.

Finally, we analysed a use case in the area of **green bonds**. In particular, we focused on secondary market trades based on the Ethereum blockchain (proof-of-stake). Digital green bonds have the potential to attract increased investment in the expansion of renewable energies. Studies emphasise the advantages of blockchain, particularly the increased transparency, which leads to more trust and investment. The results of the analysis are presented in Table 4.

**Table 4: Results of the quantitative assessment of green bonds**

	ADP (kg Sb eq.)	KSA (kWh/a)	KEA (MJ/a)	GWP (kg CO2 eq./a)
I: Impact per Ethereum computing unit	$7,5 \cdot 10^{-12}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$
II: Number of Ethereum computing units per transaction <sup>2</sup>	170.000	170.000	170.000	170.000
<b>III: Impact per transaction (I*II)</b>	<b>0,000001</b>	<b>0,03</b>	<b>0,45</b>	<b>0,02</b>

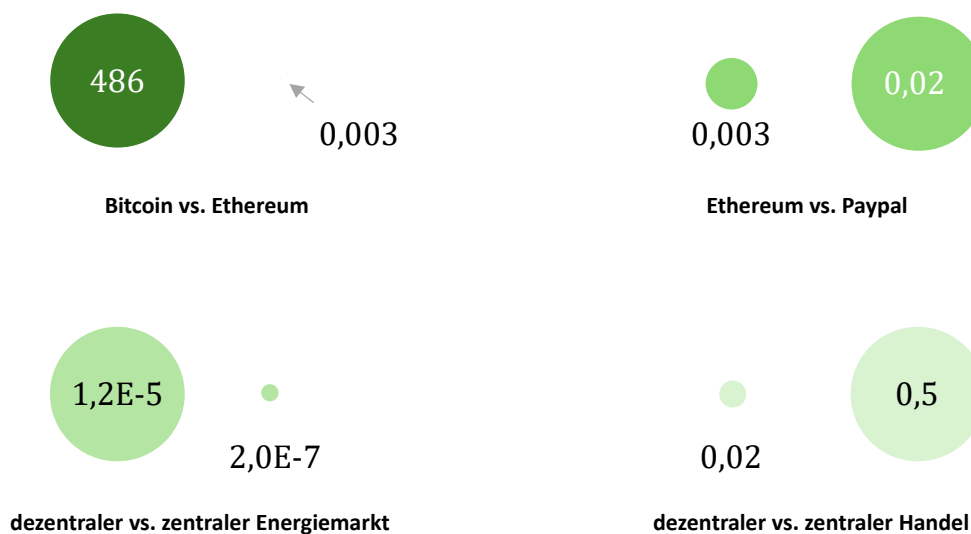
Source: own calculations.

Calculations show blockchain can be efficient for green bond trading. The key figures shown in Table 4 are lower than the values determined as an example for trading on the Swiss stock exchange (Total greenhouse gas emissions divided by the total number of transactions on the Swiss stock exchange: 0,5 kg CO<sub>2</sub> eq./a). The differences are primarily due to the operation of the Swiss stock exchange infrastructure. The positive effects described are therefore not outweighed by the environmental resources required by the blockchain.

Most important results for greenhouse gas emissions are illustrated in Figure 1.

<sup>2</sup> A trade on Uniswap costs around 170,000 Ethereum Gas units.

**Figure 1: Comparison of greenhouse gas emissions in kg CO<sub>2</sub> eq./a per transaction**



Source: own calculations (see Tables 1 to 4).

The four use cases and their comparisons illustrate the key factors influencing environmental resource consumption: the consensus mechanism and redundant computations. Blockchains that use energy as security for their consensus mechanism perform significantly worse in terms of environmental impact than centralised solutions are implemented. In contrast, blockchain solutions based on consensus mechanisms other than Proof-of-Work can achieve a better environmental balance despite redundant computations. This is particularly true when they replace traditional financial services or at least parts of them.

Regarding computations, it is important to note that the analysis is based on estimates, as blockchain systems are decentralised. Therefore, the results should be interpreted as indicative trends rather than precise measurements. While the model considers various factors, it faces limitations, particularly in accurately estimating the energy mix used and precisely defining the hardware and software involved. Despite these limitations, robust conclusions can still be drawn. Notably, Bitcoin transactions are associated with significant environmental impacts.

Governments are constitutionally obligated to initiate the transition to a sustainable economy through legislative measures and to implement regulations that mitigate negative environmental effects. Thus, relevant regulatory measures for blockchains were discussed in the second part of the study. Additionally, blockchain technology may contribute to solving environmental challenges. For this reason, we first examined the civil and data protection law challenges associated with blockchain-based smart contracts.

#### **Civil law requirements for the design of smart contracts**

Based on the applicability of German civil law, we analysed two application constellations of smart contracts with regard to their civil law requirements:

- ▶ the use of smart contracts for the conclusion of contracts and
- ▶ the use of smart contracts for the automated execution of contracts.

To this end, we analysed the legal literature and, based on this, various challenges in the use of smart contracts were identified and discussed in an overview.

Smart contracts are not contracts in the legal sense, but computer programmes. In order for a contract to exist in the legal sense and for the smart contract to generate legal effects, the actual processes of the computer programme must fulfil legal requirements for the conclusion of the contract. If a smart contract is to serve to enforce contracts, the processes recorded in the programme must comply with the legally mandatory requirements for the execution of the contract.

Fundamental civil law concerns do not prevent the use of smart contracts in legal transactions. Smart contracts can be used to conclude contracts as long as no form stricter than text form (Art. 126b BGB) is required. In principle, there is freedom of contract in the execution of contracts (Art. 2 para. 1 GG), so that the parties can regulate the use of smart contracts as they wish within the limits of mandatory law. Difficulties may arise in particular with self-enforcement clauses, price adjustment clauses and the reversal of legally invalid transactions.

Blockchain applications generally fall within the scope of the GDPR and must therefore fulfil data protection requirements. Overall, the compatibility of the GDPR with decentralized data processing models is limited. The GDPR was developed for centralised data processing models and therefore leads to numerous conflicts between blockchain and data protection. Wherever subsequent modification of data is required, blockchains reach the limits of the technical feasibility of enforcing the rights of data subjects due to the immutability of the content. Permissionless blockchains are therefore regularly classified as contrary to data protection regulations if they contain personal data worthy of protection. By designing the blockchain as a permissioned blockchain, the data protection conflicts can be mitigated or even overcome. However, it should be borne in mind that such permissioned blockchains are often associated with disadvantages in terms of the security architecture and numerous advantages of blockchain technology are lost.

### **Analysis of the existing regulatory framework for blockchain**

As a starting point for the development of recommendations for the adaptation of the regulatory framework, we outlined and summarized the existing regulatory framework. The focus of the presentation is on the regulation of crypto assets and, above all, on the legal framework provided by

- ▶ German and European financial market regulation,
- ▶ money laundering regulation and
- ▶ tax law.

Based on this legal framework, we analysed selected legal norms for their incentive effect on the sustainable use of blockchains. The analysis is limited to legal norms that, in our view, had the potential to influence the sustainability-related behaviour of stakeholders. Either because the norms deal directly with the climate and environmental impact of blockchain or because they can have an indirect effect on the user behaviour of the actors. In addition, other legal norms were also considered that are not directly related to the regulation of blockchains but can at least indirectly influence the sustainable use of blockchains. Incentives for the behaviour of a rational actor were then identified from these selected legal requirements. We analysed these incentives and evaluated them in terms of their environmental impact. The analysis of the environmental impacts takes up various sustainability aspects that were already discussed in WP I. In particular, we analysed the following legislation:

- ▶ whitepaper obligation in the MiCA Regulation,

- ▶ tax-reducing deduction of income-related expenses for energy costs,
- ▶ one-year speculation period for crypto tokens,
- ▶ funding conditions for blockchain projects,
- ▶ greenhouse gas emission allowance trading under the EU ETS and
- ▶ Energy Efficiency Act.

The analysis of the current legal framework shows that the negative environmental effects of blockchains are covered by the regulatory framework in Germany, but only insufficiently. The use of blockchain can lead to market failure due to the lack of internalisation of external effects on the environment and due to information asymmetries between market players, which justifies corresponding market interventions. The EU ETS is a measure that attempts to minimise the identified market failure. However, this measure only affects mining activities within the EU. If mining takes place outside Europe, this regulation does not apply, as is the case with other digital services. The increase in energy prices due to the EU ETS within the EU can therefore lead to a relocation of mining abroad and thus undermine the regulation („carbon leakage“).

**Development of recommendations for adapting the regulatory framework**

Based on this regulatory deficit, we discussed measures and their advantages and disadvantages. To this end, suggestions from literature and politics were taken up and various measures were identified with the aim of reducing the market failure. An overview of these measures is shown in Table 5.

**Table 5**                      **Categorisation of regulatory measures**

Ordnungsrechtliche Instrumente	Informatorische Instrumente	Freiwillige Vereinbarungen	Ökonomische Instrumente
Verbot von Mining	Umweltlabel für Blockchains	Selbstverpflichtungen von Unternehmen	Importzölle/Abgaben/ Subventionen bei der Erneuerung der Hardware
Verbot von Handel, Besitz und Dienstleistungen im Zusammenhang mit POW-basierten Kryptowerten	-	-	Beihilfen für Forschung und Entwicklung
Umweltverträglichkeitsprüfung für Mining Farmen (UVP)	Informationskampagne über den Energieaufwand neuer Technologien	-	Transaktionssteuer für Kryptowerte
			Verlängerung der Spekulationsfrist auf zehn Jahre
			Cap-and-Trade System

Source: own illustration / light green - impact on the operation of the blockchain, grey - impact on the trading of crypto assets.

We analysed the identified measures based on their incentives and environmental impact. Their advantages and disadvantages are assessed using the following criteria:

- ▶ **Effectiveness:** Describes the ability of the measure to achieve the goal of a more sustainable use of blockchain and thus reduce market failure. When assessing effectiveness, the extent to which the intervention mechanism contributes to achieving the objective is examined. We consider effectiveness both at EU level and in a global context, provided that the measure is implemented at EU level.
- ▶ **Efficiency:** Describes the costs of the measure compared to its effectiveness. If the measure achieves its effectiveness at minimum cost and by minimising market distortions, the measure is economically efficient. The costs include both direct costs, such as expenditure on subsidies, and indirect costs, such as undesirable market distortions.
- ▶ **Feasibility:** Describes the extent to which the measure is feasible in terms of political, legal and practical aspects. The administrative implementation and enforcement costs are also included in the feasibility.

Effective regulation presents considerable challenges. In particular, decentralisation, internationality and pseudonymity of blockchains pose key challenges. Often regulation must rely on the support of centralised (professional) intermediaries in order to enforce the measures. Such actors are not necessarily present in permissionless blockchains (decentralised). Regulation is therefore more difficult to enforce.

**First-best options** are measures that directly address the environmental impact (such as carbon emissions emitted or use of abiotic resources), ensuring the internalization of external effects without introducing additional market distortions. Such internalisation could theoretically be achieved through a **global cap-and-trade system**. In this case, the regulator limits itself to setting the maximum permitted global environmental impact („cap“). The internalisation of the external effects or the adjustment to the quantity restriction is left to the individual players on the market („trade“). This ensures an efficient allocation of environmental resources. With the exception of setting the upper limit, such a measure requires little information from the regulating authority. This measure also has the advantage that it reduces undesirable side effects such as distortions on neighbouring markets and is therefore associated with low economic costs.

However, a global cap-and-trade system is likely to be difficult to implement due to differing interests between countries. Accordingly, **second-best measures** were also discussed. Such second-best measures are focussed on the **European or German level** due to the difficulty of global implementation. However, it cannot be ruled out that such measures could also have global signalling effects. A measure at European or German level can act as a role model for other countries.

The addressees of second-best measures could be miners on the supply side and investors in crypto assets and users of blockchains on the demand side. Incentives play a central role when it comes to how investors choose their investments in crypto assets. When investing in crypto assets, investors are sometimes supported by intermediaries such as crypto exchanges. Therefore, some of the measures discussed address both investors and intermediaries. Changes in the demand behaviour of investors and users can then also indirectly influence the supply by miners.

The analysis shows that **local supply-related measures** focussing **on miners** are likely to have less direct global impact than demand-related measures due to the relocation problem. Although such measures also reduce local environmental impacts (particularly greenhouse gas emissions), these can be offset by substituting growth in other regions. Only global measures can have a significant global effect here. This limited effect can be seen in the regulatory ban on POW mining, the mandatory UVA for mining farms, a cap-and-trade system and a tax.

**Demand-related measures** promise greater (global) effectiveness, with the **focus on intermediaries**. A reduction in European demand leads to a global reduction in demand, which presumably could not be easily compensated for by foreign players. The global effectiveness of these measures should therefore be rated higher. In this context, the report discusses bans, price measures (e.g. speculation period, transaction tax) and informational measures (e.g. environmental labelling, information campaign).

A **ban** on owning or trading proof-of-work crypto assets (whether on trading exchanges or outside) would potentially be highly effective with regard to Germany and the EU, as access would be severely restricted and demand in Germany and the EU would therefore be significantly reduced. Such a ban would also be easy to implement in theory, as a regulatory framework for crypto assets already exists in the form of the MiCA Regulation. However, if the economic optimum of Proof-of-Work-mining is greater than zero, such a solution would be inefficient from an economic perspective. This is because it would not be up to the players to internalise the environmental impact and look for solutions on their own.

Alternatively, local market-orientated or information-based measures could also be considered. **Market-based measures** primarily include taxes or a cap-and-trade system. With these types of measures, externalities are internalised by imposing a levy on them. A tax is more difficult to implement here, as it is unclear ex ante how strongly the stakeholders will react to the measure. A tax may therefore need to be adjusted to achieve its effect. It is easier to impose an upper limit for emissions on the industry, which would in principle be equivalent to a cap-and-trade system. The question remains as to how high the emissions for crypto assets may be and how this is harmonised with other (financial) services.

Last but not least, we discussed **informational measures**. At European level, such an informational measure has already been taken with the obligation to publish information on the environmental impact of crypto assets in the crypto asset whitepaper in accordance with the MiCA Regulation. This measure can reduce information asymmetries and create transparency for investors regarding the environmental impact of an investment in crypto assets. However, this information often appears to be too complex to trigger a change in investor behaviour. It has therefore been further developed into an environmental label. The effectiveness of the eco-label ultimately depends on the sensitivity of investors. Only if they are prepared to change their investment behaviour can the measure have a positive environmental impact. Its effectiveness is subject to considerable uncertainty. The costs of implementing these measures, in particular the costs of obtaining information for the actors obliged to provide the label, as well as the potential for abuse, speak against them.

In summary, none of the proposed measures, nor the current regulatory status quo, fully address the challenges at hand. Ultimately, the assessment of specific measures always depends on which evaluation criterion is given how much weight. For further development, we recommend an in-depth cost-benefit analysis of the measures that were particularly emphasised according to the evaluation criteria.

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Die Veröffentlichung des Bitcoin-Whitepapers durch Satoshi Nakamoto im Jahr 2008 markierte den Beginn der Blockchain-Technologie, die seither zunehmend in verschiedensten Bereichen eingesetzt wird.

Blockchain ist eine spezifische Form der Distributed Ledger Technologie (DLT), bei der Datensätze kettenförmig miteinander verbunden werden (Natarajan et al. 2017). Der Autor bzw. die Autoren des Bitcoin-Whitepapers schafften es als erste die Kryptographie und DLT bzw. Blockchain so zu verbinden, dass Transaktionen unveränderbar in chronologischer Reihenfolge abgespeichert sind, d.h. sie lösten als erste das „Double Spending-Problem“ für DLT.

Das Konzept von DLT selbst ist hingegen nicht neu und wurde bereits vor mehreren hundert Jahren von Einwohnern in Mikronesien angewandt (Burke 2021).<sup>3</sup> Die digitale Anwendung von DLT ist hingegen neu. Blockchain wurde zuerst als Methode für das Zeitstempeln digitaler Dokumente vorgeschlagen (Haber & Stornetta 1991). Bitcoin wurde dann 2008 in Form des gleichnamigen Kryptowerts ins Leben gerufen, was gemeinhin als Initialzündung für die heutige Anwendungsform betrachtet wird. Die Blockchain als Kryptowährung stellt jedoch lediglich einen sehr trivialen Anwendungsfall dar. Die Einführung neuer Blockchains, insbesondere der Ethereum-Blockchain im Jahr 2013, sowie die damit einhergehende Einführung von Smart Contracts führten zu einer signifikanten Erweiterung des Einsatzbereichs.

Smart Contracts ermöglichen Parteien die Ausführung von Verträgen auf einer transparenten, automatisierten und vertrauenswürdigen Art, ohne einen zentralen Intermediär, wie einen Notar beiziehen zu müssen. Smart Contracts können somit anstelle von vertrauenswürdigen Intermediären treten, die alternativ zur Koordination und zur Sicherstellung des Vertrauens bzw. zur Schaffung von Transparenz notwendig sind. Sie sind insb. nützlich, wenn die Koordinationsprobleme hoch sind (z.B. bei globalen Themen oder in Bereichen in denen kein zentraler Intermediär erwünscht ist) oder wenn das Vertrauen nicht bzw. nur mit verhältnismäßig großem Aufwand geschaffen werden kann (z.B. in Staaten mit zweifelhaftem Rechtssystemen oder bei Anwendungsfällen mit isoliert betrachtet geringer Nachfrage). Smart Contracts können zudem Innovation schaffen, indem sie den Wettbewerb um den Intermediär ermöglichen und die Eintrittshürden auf dem Markt reduzieren. Die Blockchain kann entsprechend vor allem in Branchen einen Mehrwert bieten, wo Vertrauen, Transparenz und die Einhaltung von Vorschriften eine bedeutende Rolle spielen. Dies trifft insbesondere auf die Bereiche Finanzdienstleistungen und Lieferkettenmanagement zu (siehe z.B. Consensys.com 2023; Hafner & Jaag 2023; United Nations 2023).

Gleichzeitig mit der Verbreitung der Blockchains hat die Nachhaltigkeit und die Klimakrise zunehmend an Bedeutung gewonnen. Unter Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern herrscht Konsens, dass der heutige Ressourcenverbrauch nicht nachhaltig ist. Der jüngste Global Resources Outlook des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (2024) prognostiziert unter anderem, dass ohne rasches und koordiniertes Handeln der Ressourcenverbrauch im Vergleich zu 2020 bis 2060 um 60% ansteigen wird. Besondere Dringlichkeit hat die rechtliche und politische Begleitung der grünen Transformation in Deutschland insbesondere durch den Klimabeschluss des Bundesverfassungsgerichts vom 24. März 2021 erfahren. Darin mahnt das Bundesverfassungsgericht die Verpflichtung des Staates zum Schutz – auch künftiger

---

<sup>3</sup> Die Bevölkerung nutzte große Steine als Währung, die jedoch nicht physisch den Besitz wechselten. Bei jeder Transaktion wurde die Gemeinschaft die Änderung mitgeteilt. Auf diese Weise hielt praktisch jede Person Buch über die durchgeführten Transaktionen, was zu einer dezentralen Verwaltung des Handelsregisters führte.

Generationen – vor Gefahren des Klimawandels. Der Staat ist gem. Art. 20a GG zum Klimaschutz und dem Ziel der Herstellung von Klimaneutralität verpflichtet. Die staatlichen Organe sind hierbei besonders dazu aufgerufen Anpassungsvorgänge anzustoßen.<sup>4</sup>

Auch der Betrieb von Blockchain Anwendungen kann erhebliche Rechenleistung erfordern, die durch den Einsatz leistungsstarker Hardware und energieintensiver Prozesse erreicht wird. Dies führt zu einem beträchtlichen Energie- und Ressourcenverbrauch, der mit dem Energieaufwand ganzer Länder vergleichbar ist. Entsprechend ergeben sich im Bereich der Distributed-Ledger-Technologie (DLT) verschiedene Fragestellungen, die für den Umweltschutz von Relevanz sind. In diesem Kontext ist es von entscheidender Bedeutung, auch die Ressourcenaufwände von Blockchain-Anwendungen zu untersuchen und potenzielle Anpassungsvorschläge zu erörtern.

## 1.2 Auftrag / Zielsetzung

Vor diesem Hintergrund wurde Swiss Economics SE AG zusammen mit der Hochschule Luzern und Johannes Erny im Rahmen eines öffentlichen Ausschreibungsverfahrens im Juni 2023 folgender Auftrag erteilt:

- ▶ **Ermittlung der Ressourcen- und Energieaufwände von DLT-Anwendungsfällen:** Die Ressourcen- und Energieaufwände verschiedener Blockchain-Anwendungen und Kryptowerte sind zu ermitteln, um ein grundlegendes Verständnis über deren Umweltauswirkungen zu erlangen.
- ▶ **Analyse der Rahmenbedingungen für umweltfreundliche DLT-Lösungen:** Das Forschungsvorhaben soll zudem einen Überblick über den aktuellen regulatorischen Rahmen gewinnen und untersuchen, inwiefern dieser die nötigen Anreize schafft, auf nachhaltigere Lösungen zu setzen. Aus den Erkenntnissen sollen Vorschläge für gesetzliche Anpassungen oder Schärfungen erarbeitet werden.

Mithilfe der Ergebnisse aus den zwei Arbeitspaketen sollen Empfehlungen hergeleitet werden, um einen rechtssicheren Einsatz von DLT-Lösungen für Umweltschutzbelange zu ermöglichen.

Der vorliegende Bericht dokumentiert das Ergebnis der Forschungsarbeit.

---

<sup>4</sup> BVerfG Beschl. v. 24.3.2021 - 1 BvR 2656/18 ua, NJW 2021, 1723 Ls. 1, 2. Der Klimabeschluss des Bundesverfassungsgerichts verlangt von dem Gesetzgeber unter anderem die notwendigen "Voraussetzungen und Anreize" für eine Transformation zur Klimaneutralität zu schaffen (BVerfG Beschl. v. 24.03.2021 - 1 BvR 2656/18, 78, 96, 288/20, E 157, 30 Rn. 248). Diese Transformation ist nicht allein eine staatliche Aufgabe (BVerfG Beschl. v. 24.03.2021 - 1 BvR 2656/18, 78, 96, 288/20, E 157, 30 Rn. 248). Neben den staatlichen Stellen müssen auch private Wirtschaftsunternehmen und Einzelne den Transformationsprozess gestalten und ihr Verhalten verändern (Burgi, 2021, S. 1406).

## 1.3 Vorgehen

Die Arbeitspakete und die einzelnen Arbeitsschritte des Forschungsvorhabens *Umweltbewertung und regulatorische Herausforderungen von DLT-Lösungen* sind in der folgenden Textbox dargestellt. Das Vorgehen lehnt sich stark an die beiden Teilaufträge an.

### Arbeitspakete und deren Inhalte

#### AP I: Ermittlung der Ressourcen- und Energieaufwände von DLT-Anwendungsfällen

- ▶ Literaturrecherche über die Ergebnisse früherer UBA-Forschungsprojekte sowie über bestehende Methoden und Datensätze
- ▶ Auswahl von DLT-Anwendungsfällen und deren Alternativen
- ▶ Entwicklung und Auswahl einer geeigneten Methode und Datenbeschaffung
- ▶ Durchführung der Umweltbewertung für verschiedene Anwendungen

#### AP II: Regulatorische Herausforderungen und Anforderungen für den Einsatz von Blockchains

- ▶ Überblick über zivilrechtliche und datenschutzrechtliche Herausforderungen für den Einsatz von Blockchain-basierten Smart Contracts
- ▶ Identifikation relevanter Gesetze und Regelungen im deutschen und europäischen Recht
- ▶ Analyse des regulatorischen Rahmens auf Anreize für einen nachhaltigen Einsatz von Blockchain
- ▶ Herleitung von Handlungsempfehlungen für den Einsatz von DLT-Lösungen im Umweltschutz

## 1.4 Struktur des Berichts

Der Bericht ist wie folgt gegliedert:

**Kapitel 2** dokumentiert die DLT-Lösungen in praktischen Anwendungsfällen.

**Kapitel 3** präsentiert die Methodik und Ergebnisse der Umweltbewertung.

**Kapitel 4** fasst die regulatorischen Herausforderungen und Anforderungen für den Einsatz von Blockchain zusammen.

**Kapitel 5** stellt mögliche Empfehlungen für die Anpassung des regulatorischen Rahmens vor.

**Kapitel 6** fasst das Vorgehen und die wichtigsten Erkenntnisse zusammen.

## 2 DLT-Lösungen in praktischen Anwendungsfällen

### 2.1 Literaturrecherche

Um den aktuellen Stand von DLT-Lösungen und ihrer Anwendung im Umweltschutz zu erfassen, wird in einem ersten Schritt eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Diese ist wie folgt gegliedert:

- ▶ In Abschnitt 2.1.1 werden die Erfahrungen und Erkenntnisse aus den früheren Forschungsprojekten des Umweltbundesamtes beschrieben;
- ▶ In Abschnitt 2.1.2 wird der Mehrwert von DLT-Anwendungen diskutiert;
- ▶ In Abschnitt 2.1.3 werden bereits entwickelte Methoden für die Messung der Umweltwirkung von DLT-Lösungen präsentiert;
- ▶ In Abschnitt 2.1.4 wird der aktuelle Wissenstand über Ressourcen- und Energieaufwände von DLT-Lösungen beschrieben;
- ▶ In Abschnitt 2.1.5 werden bereits vorhandene Datensätze bezüglich der Umweltwirkung von DLT-Lösungen vorgestellt.

#### 2.1.1 Die Erfahrungen und Erkenntnisse aus den früheren Forschungsprojekten des Umweltbundesamtes

So weit wie möglich und anwendbar, werden die Erkenntnisse aus früheren Forschungsprojekten des Umweltbundesamtes genutzt. Unsere Literaturrecherche beginnt deshalb mit den folgenden vier Studien des Umweltbundesamtes:

- ▶ Die Green-Software Studie (UBA 2015) identifiziert Lösungsansätze zur Umweltbewertung von Software;
- ▶ Die zweite Software-Studie des UBAs (UBA 2018) führt dann eine Umweltbewertung für Software durch;
- ▶ Die KPI4DCE-Studie (UBA 2018) bewertet die Umweltwirkung von Rechenzentren;
- ▶ Die GCC-Studie (UBA 2021) bewertet die Umweltwirkung von Cloud-Computing-Dienstleistungen.

Diese Studien werden nachfolgend im Detail beschrieben.

#### **Green Software: Analysis of potentials for optimizing software development and deployment for resource conservation, subproject 3 (2015)**

Die Green Software-Studie untersucht explorativ den Einfluss von Software auf die Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen durch Hardware. Sie identifiziert potenzielle Herausforderungen bei der Messung der Ressourcen- und Energieeffizienz von Software, und schlägt entsprechende Lösungen vor.

Die Studie identifiziert drei Herausforderungen: (1) die Festlegung der richtigen funktionellen Einheiten – was ist der Output einer Software, (2) der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Komponenten eines Computers und der Software, sowie (3) die Allokation der Aufwände auf eine einzelne Software, da in der Regel mehrere Anwendungen gleichzeitig ausgeführt werden.

Die Autoren schlagen u.a. folgende Ansätze vor: Lösung der funktionellen Einheit (1) und des Allokationsproblems (3) durch Standardisierung. Sie beschreiben dabei bereits existierende Standardisierungsansätze, darunter solche vom GHG Protocol und der International Telecommunications Union. Zudem schlagen sie, in Analogie zu den etablierten Fahrzyklen bei Fahrzeugen, Software-Zyklen (standardisierte Anwendungsfälle bzw. -abläufe) als neue Möglichkeit vor, um Ergebnisse besser Vergleichen zu können. Zur Lösung der funktionellen Einheit (1) schlagen sie noch den Vergleich von funktional gleichen Softwareprodukten vor, die sich nur in einer Dimension unterscheiden: z.B. Vergleich der Desktop-Version von Microsoft Word mit ihrer Cloud-Version. Schließlich diskutieren sie die Betrachtung verschiedener Softwareversionen über die Zeit, um daraus Erkenntnisse zur Effizienz ziehen zu können, ohne dabei die oben beschriebenen Herausforderungen zu dem Zusammenhang der Komponenten (2) und zur Allokation (3) berücksichtigen zu müssen.

**Relevanz für unsere DLT-Studie:** Die Definition der funktionellen Einheit ist auch bei der Umweltbewertung von DLT eine Herausforderung. Dies insbesondere, wenn nicht nur grundlegende Funktionen wie die Transaktionen eines Kryptowerts, sondern komplexere Anwendungen, wie beispielsweise ein Web3-Spiel oder der Handel auf dezentralen Börsen bewertet werden sollen. Die Erkenntnisse zur Standardisierung sind entsprechend auch für die vorliegende Studie relevant. Die weiteren Lösungsansätze – relativer Vergleich zwischen unterschiedlichen Varianten oder über die Zeit – sind vor allem für den Effizienzvergleich geeignet<sup>5</sup>, können jedoch nicht für absolute Messungen verwendet werden.

**Entwicklung und Anwendung von Bewertungsgrundlagen für ressourceneffiziente Software unter Berücksichtigung bestehender Methodik (2018)**

Die zweite softwarebezogene Studie basiert auf den Erkenntnissen der Green-Software-Studie (2015) und vergleicht verschiedene Softwarelösungen hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen. Da der Fokus auf dem Vergleich der Software liegt, betrachten die Autoren Hardware und Strommix als gegeben und ziehen diese nicht ausführlich in Betracht.

Im Rahmen der Studie wird (1) ein Wirkungsmodell zwischen Software und der beanspruchten Hardware entworfen (2) daraus abgeleitet ein Kriterienkatalog für die Bewertung entwickelt und schließlich (3) die Methodik anhand von Fallbeispielen getestet.

**Abbildung 2: Systematik der Bewertungskriterien aus der Softwarebewertungsstudie des Umweltbundesamtes**

1 Ressourceneffizienz	2 Potenzielle Hardware-Nutzungsdauer	3 Nutzungsautonomie
1.1 Hardwareeffizienz	2.1 Abwärtskompatibilität	3.1 Transparenz und Interoperabilität
1.2 Energieeffizienz	2.2 Plattformunabhängigkeit und Portabilität	3.2 Deinstallierbarkeit
1.3 Ressourcenmanagement	2.3 Hardwaresuffizienz	3.3 Wartungsfunktionen
		3.4 Unabhängigkeit von Fremdressourcen
		3.5 Qualität der Produktinformation

Quelle: UBA (2018).

<sup>5</sup> Ein Vergleich zwischen verschiedene Varianten könnte z.B. zur Effizienz-Messung verschiedene Layer-1 Protokolle verwendet werden. Ein Vergleich des Ressourcen- bzw. Energieaufwands über die Zeit kann in vielen Fällen wertvolle Einblicke liefern. So zum Beispiel bei Forks einer Blockchain, welche Protokoll-Änderungen mit sich ziehen oder beim Wechsel des Konsensmechanismus, wie es bei Ethereum (ETH) der Fall war.

Für die Bewertung werden die Kriterien aus dem gebildeten Kriterienkatalog in drei Gruppen einsortiert: Diese sind in Abbildung 2 dargestellt. Diese Gruppen beinhalten jeweils verschiedene Indikatoren. Dazu zählen quantitative (wie z.B. der Energieaufwand bei Standard-Konfiguration und Standard-Nutzung), aber auch qualitative Elemente (wie z.B. ob die beanspruchte Hardwarekapazitäten, der Datenfluss und die Energieverbräuche angezeigt werden und wenn ja, ob diese korrekt angezeigt werden). Im Falle der messbaren Kriterien wurden Labormessungen durchgeführt.

**Relevanz für unsere DLT-Studie:** Die in dieser Studie entwickelte Bewertungsmethode und der Kriterienkatalog konzentrieren sich auf den Vergleich verschiedener Softwarelösungen. Die Autoren berechnen daher nicht die absoluten Ressourcen- und Energieaufwände. Die Studie betrachtet die Hardware als gegeben, weshalb die Aufwände für die Herstellung der Hardware nicht berücksichtigt werden. Die verwendeten Kennzahlen beziehen sich zudem auf Software, die für diese Studie nicht relevant sind. Daher sind die entwickelte Methode und die Kriterien für die vorliegende Studie weniger geeignet.

#### **Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit (2018) – KPI4DCE-Studie**

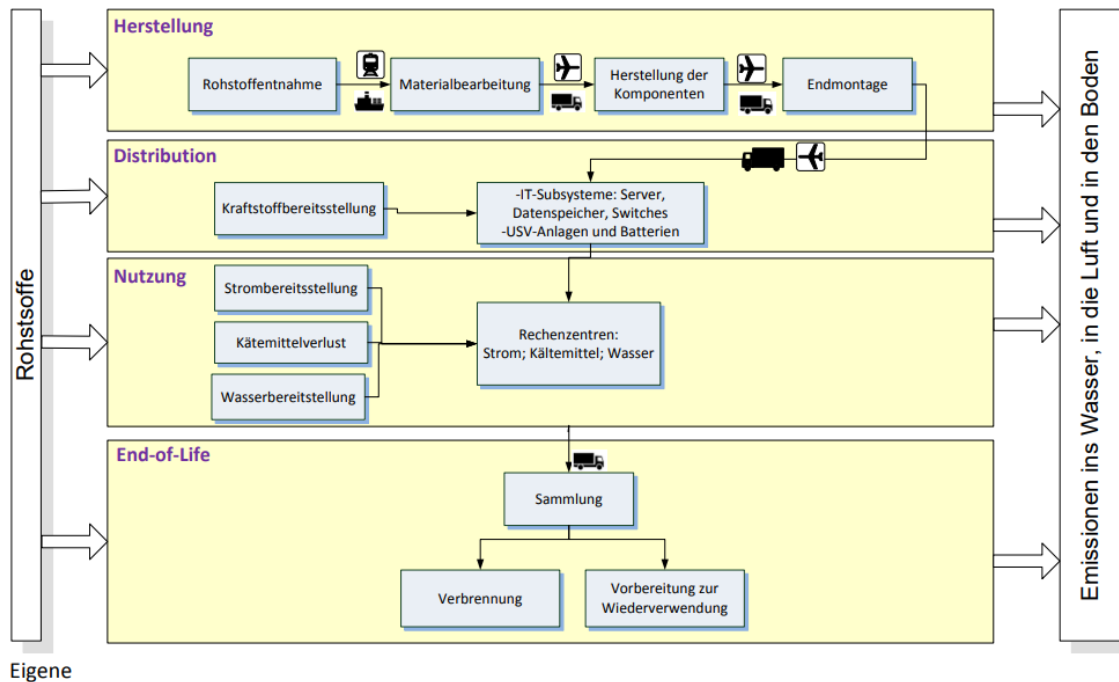
Die KPI4DCE-Studie bewertet die Energie- und Ressourceneffizienz von Rechenzentren.

Die Autoren verwenden hierfür die Ökobilanz-Methode. Sie unterteilen den Lebenszyklus eines Rechenzentrums in vier verschiedene Phasen (Herstellungs-, Distributions-, Nutzungs- und End-of-Life-Phase) und führen eine Bewertung der jeweiligen Phase durch. Als Output werden vier Umweltaspekte bzw. Aufwandskennzahlen berechnet. Diese sind der (1) abiotischer Rohstoffverbrauch, (2) der Energieaufwand, (3) das Treibhausgaspotenzial, sowie (4) der Wasserverbrauch (vgl. auch Abbildung 3).

Der Ressourcenaufwand, bestehend aus Aufwandsindikatoren, im Verhältnis zur Leistung, die sich aus verschiedenen Nutzungsindikatoren zusammensetzt, ergibt die Effizienzkennzahlen, anhand derer die Rechenzentren miteinander verglichen werden.

Die Studie kommt unter anderem zu dem Schluss, dass 99% der Umweltauswirkungen auf die Herstellungs- und Nutzungsphase entfallen. Die Phasen der Distribution und des End-of-Life weisen somit in Bezug auf Rechenzentren kaum Relevanz auf.

**Abbildung 3: Schematische Darstellung der Systemgrenzen der Ökobilanzierung in der KPI4DCE-Studie**



Eigene  
Quelle: UBA (2018).

Die Berechnungen sind in einem Excel-Tool implementiert. Hierbei werden Primärkennzahlen (die von den Autoren erfasst oder aus der Literatur entnommen wurden) mit Informationen zur Rechenzentrumsausstattung, einschließlich Hardware und Geräten sowie deren Spezifikationen, sowie den Betriebsaufwänden wie Energie-, Wasser- und Kältemittelverbrauch im Vergleich zur IT-Leistung des Bilanzjahres verknüpft. Das Tool erlaubt es, die Ressourceninanspruchnahme auf die einzelnen Subsysteme eines Rechenzentrums (Gebäudetechnik, Server, Datenspeicher und Netzwerke) und die Phasen des Lebenszyklus (Herstellung, Distribution, Nutzung und End-of-Life) im Detail zu analysieren. Zur Plausibilisierung bzw. als Pilot wird das Tool zudem auf drei Rechenzentren angewandt.

**Relevanz für unsere DLT-Studie:** Die Studie bietet eine gute Grundlage für die Umweltbewertung von DLT. Letztere basiert ebenfalls auf verschiedene Hardware, die aus unterschiedlichen Komponenten zusammengesetzt sind. Die angewandte Ökobilanz mittels der Software OpenLCA wie auch die Primärdaten insb. zu Computer-Chips können zum größten Teil auch auf die DLT-Infrastruktur übertragen werden.<sup>6</sup> Für einen allfälligen Vergleich zweier Blockchains können zudem analoge Effizienzkennzahlen gebildet werden. Im Vergleich zu Rechenzentren sind DLT-Infrastruktur bezogene Anwendungen jedoch dezentral verteilt, was entsprechend bei der Methodik und der Diskussion der Umweltbewertung berücksichtigt werden muss. Für den Vergleich mit alternativen Anwendungen sind zwecks Standardisierung weiterführende Berechnungen notwendig. Insgesamt hat die Studie jedoch eine hohe Relevanz für die vorliegende Analyse und wird als Grundlage verwendet.

<sup>6</sup> Vgl. auch die erwähnte Methode zur Messung des abiotischen Rohstoffverbrauchs (sog. Midpoint-Methoden).

### **Green Cloud Computing Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing (2021) – GCC-Studie**

Die Green Cloud Computing-Methode (GCC-Methode) ist eine weiterentwickelte Version der vorangehend diskutierten KPI4DCE-Methode. Sie bezweckt die Umweltbewertung von Cloud Computing Dienstleistungen.

Im Vergleich zur KPI4DCE-Studie steht in der GCC-Methode der Aufwand für eine Dienstleistungseinheit (z.B. 1 Stunde Videostreaming) und nicht die Effizienz eines Rechenzentrums im Vergleich zu einem anderen, im Vordergrund. Bei der GCC-Methode werden deshalb Aufwandskennzahlen und nicht Effizienzkennzahlen berechnet.

Die GCC-Methode bildet entsprechend ein Verhältnis zwischen Aufwand und Serviceeinheit und berechnet den Umweltaufwand (analog KPI4DCE) pro Dienstleistungseinheit.

Die Einheit der Kennzahl hängt von der Einheit der jeweiligen Dienstleistung ab, wobei die Dienstleistungen flexibel definiert werden können (z.B. pro Stunde, pro Zeiteinheit oder angewendet auf DLT pro Block).

Die KPI4DCE-Methode stellt dagegen den Nutzen der einzelnen Teile der RZ-Infrastruktur (Server, Netzwerk und Datenspeicher) im Verhältnis zum Umweltaufwand der Herstellung der einzelnen IT-Komponenten des Rechenzentrums dar.

Auch wenn die GCC-Methode ein unterschiedliches Ziel verfolgt, basiert sie ebenfalls auf dem Excel-Tool der KPI4DCE-Methode und verwendet dieselben (aktualisierten) Datengrundlagen.

**Relevanz für unsere DLT-Studie:** Im Vergleich zu der Bewertungsmethode der Software, bezweckt die GCC-Methode auch absolute Aussagen über die Ressourcen- und Energieaufwände. Die analoge Definition von Dienstleistungseinheiten bei DLT-Lösungen, und deren Vergleich mit dem Umweltaufwand könnte sich als eine vielversprechende Methode erweisen. Diese Studie beinhaltet zudem unzählige Berechnungen zu den verbrauchten Ressourcen in der einzelnen IT-Komponenten (analog KPI4DCE). Daher wird bei der Erarbeitung der Methodik und bei der Schaffung der geeigneten Datengrundlage stark auf diese beiden Studien gestützt.

#### **Zusammenfassung**

Die Berichte des Umweltbundesamtes sind eine gute Grundlage für die Schätzung der Umweltwirkung von DLT. Insbesondere die Ökobilanz-Methodik aus der KPI4DCE- (2018) bzw. GCC-Studie (2021) erscheint uns als zum größten Teil anwendbar auf DLT. Bei der Bewertung von einzelnen Hardwarekomponenten kann auf die vom UBA aufwendig erstellte Datengrundlage zu der Ökobilanzierung von Hardwarekomponenten gestützt werden. Diverse Erkenntnisse aus der Green Software-Studie zu Standardisierung und zu der Definition der funktionellen Einheiten können uns ebenfalls als Wegweiser dienen.

### 2.1.2 Potentieller Mehrwert von DLT-Anwendungen

Die DLT ist dafür bekannt, dass sie Prozesse automatisiert und Daten manipulationssicher und nachvollziehbar macht (BDEW 2017; Bogensperger et al. 2018a). Sie kann direkte Interaktionen zwischen unbekanntem Akteuren ermöglichen und so das traditionelle Modell der Wertschöpfung hin zu dynamischeren Wertschöpfungsnetzwerken transformieren. Diese Technologie kann deshalb unter anderem für den Finanz- den Energiesektor relevant sein. Im Finanzsektor kann sie bestehende Intermediäre ganz oder teilweise ersetzen, indem sie die Funktion der Verwahrung übernimmt oder als Zahlungsnetzwerk genutzt wird. Im Energiesektor kann sie unter anderem in Kombination mit dem Internet der Dinge (IoT), Big Data und künstliche Intelligenz einen Beitrag zur Netzflexibilität und Energieeffizienz leisten (Culotta et al. 2022). Auch unterstützt die Technologie neue Formen der Produktdifferenzierung (BDEW 2017). Sie erlaubt zum Beispiel den direkten Handel zwischen privaten Energieproduzenten und Verbraucherinnen und Verbraucher (Peer-to-Peer Handel), ohne auf einen zentralen Intermediär abzustellen. Die Technologie kann entsprechend zu geringeren Verwaltungs- und Regulierungskosten führen. Weiter kann sie potentiell eine Rolle beim Handel von Umweltzertifikaten, wie CO<sub>2</sub>-Zertifikaten spielen, oder als Technologie für Datenregister genutzt werden. Im Energiegroßhandel (OTC Wholesale) kann DLT zudem potentiell den Handel zwischen Unternehmen und Länder vereinfachen (Dick & Praktiknjo 2019). Diese Handelsplattformen können und werden teils von länderübergreifenden Verträgen und weltweiten Organisationen geführt (z.B. SWIFT im Finanzsektor), was aber einen erheblichen Koordinationsaufwand und Vertrauen in diese voraussetzt (z.B. Franchina und Carlomagno 2019, Bindseil und Pantelopoulos 2022). Eine Übersicht der bereits realisierten globalen Anwendungen von Blockchain-Technologie in der Energiewirtschaft befindet sich im Impulspapier der Technischen Universität Berlin (Corusa et al. 2021)

Smart Contracts, die auf DLT basieren, können für die Energiewirtschaft entsprechend von wesentlicher Bedeutung sein. Sie ermöglichen Transparenz und Manipulationssicherheit und können Eigentumsverhältnisse dokumentieren. Sie beschleunigen den Datenaustausch, die Abrechnung und können Intermediäre überflüssig machen (Bogensperger et al. 2018a). Sie können auch im Energiesektor eine Rolle spielen, indem sie potentiell die Effizienz der Verteilung erhöhen, die Integration von erneuerbaren Energien in Energiesysteme fördern und das Anlagenmanagement / Metering verbessern. Durch den dezentralen Charakter der Technologie können Verteilungsaufwände delegiert werden (Peer-to-Peer Handel) und somit kann die Bereitschaft gefördert werden, in energieproduzierende Systeme wie Photovoltaik-Anlagen und Batteriespeichersysteme zu investieren. Weiterhin können durch die Tokenisierung Kleininvestoren einfach und transparent in erneuerbare Energien investieren. Die Käufer bzw. Investoren profitieren hierbei von geringeren Kosten bzw. die geringeren Kosten erlauben den Anwendungsfall erst, da kein zusätzlicher Intermediär entschädigt werden muss.

Darüber hinaus lässt sich die Blockchain-Technologie ebenfalls in Smart Grids und Microgrids einsetzen, um unabhängig von der Kontrolle Dritter den Energieaustausch zwischen Verbrauchern und Produzenten zu organisieren. Zu den möglichen Vorteilen einer solchen Anwendung zählen reduzierte Verwaltungskosten sowie eine gesteigerte Transparenz, was wiederum niedrigere Regulierungskosten zur Folge haben könnte (Corusa et al. 2020; Vlachos et al. 2022).

Heutige Energiemärkte kämpfen oft mit veralteten, zentralisierten und ineffizienten Systemen zur Datenerfassung und -übermittlung und es fehlt oft an Transparenz, was zu Vertrauensverlust und Ineffizienzen führen kann. Weiterhin haben kleine Energieproduzenten und -verbraucher oft nur beschränkten Zugang zu den Energiemärkten aufgrund gesetzlicher

Vorschriften. DLT hat das Potenzial, die Komplexität zukünftiger Energiemärkte zu bewältigen, beispielsweise durch die Ermöglichung einer quasi Echtzeit-Koordination von Stromangebots- und Nachfragedaten. Sie kann auch benutzt werden, um Energiespeicherkapazitäten in den Energieversorgungsnetzen ordnungsgemäß zu verwalten und die Elektromobilität zu unterstützen (Vlachos et al. 2022). Die Anwendungen von DLT im Energiesektor umfassen unter anderem die Ladeinfrastruktur für die E-Mobilität, die Zertifizierung der Energieproduktion, die Implementierung von Microgrids und Nachbarschaftsmodellen sowie den Stromgroßhandel (BDEW 2017, Corusa et al. 2020).

Ein weiterer Bereich, in dem DLT einen Mehrwert liefern kann, ist die Umsetzung der Empfehlungen der Task Force on Climate-Related Financial Disclosures (TCFD). Die DLT kann die Transparenz und Nachvollziehbarkeit von Klimarisiken und -chancen verbessern und damit zur Verbesserung der Umwelt-, Sozial- und Governance (ESG)-Leistung von Unternehmen beitragen (SCL 2023). Darüber hinaus wird die DLT bereits in Projekten zur Klima- und Umweltverbesserung sowie im Energiesektor eingesetzt (Schlumberger 2022).

### Zusammenfassung

Die Literatur zeigt, dass DLT in Zukunft trotz vorhandener Herausforderungen möglicherweise eine Rolle im Umweltschutz und im Energiesektor spielen kann. Die Technologie zeichnet sich durch ihre Fähigkeit aus, Prozesse zu automatisieren, Interaktionen zwischen verschiedenen Akteuren zu vereinfachen sowie Transparenz und Nachvollziehbarkeit zu verbessern. Diese Eigenschaften könnten theoretisch zu einer nachhaltigeren und effizienteren Energieversorgung führen. Jedoch müssen die tatsächlichen Umweltauswirkungen der DLT noch gründlich erforscht und verstanden werden. Besonders bei Blockchains, die durch hohen Energieaufwand charakterisiert sind, ist eine nuancierte Analyse erforderlich, um ein Gesamtbild zu erhalten. Hinsichtlich des Potenzials sollte auch die zukünftige Entwicklung der DLT im Auge behalten werden. Blockchains erforschen fortlaufend neue Ansätze, um die Effizienz der Technologie zu steigern (z.B. durch sogenannte Layer-2-Lösungen). Darüber hinaus gibt es noch eine Reihe offener Fragen im Zusammenhang mit der Interoperabilität, den Standards und der Regulierung. Diese Faktoren könnten einen erheblichen Einfluss auf die Weiterentwicklung und das potenzielle Leistungsvermögen der DLT ausüben.

### 2.1.3 Bereits entwickelte und etablierte Methoden für die Messung der Umweltwirkung von DLT

Zur Messung der Umweltauswirkungen von Distributed Ledger Technologien werden in der Literatur mehrere Methoden vorgeschlagen. Die angewandte Methodik unterscheidet sich hauptsächlich je nach dem zu untersuchenden Konsensmechanismus. Die wichtigsten Konsensmechanismen sind Proof-of-Work (POW), welcher zum Beispiel in der Bitcoin Blockchain zum Einsatz kommt, und Proof-of-Stake (POS), welcher zum Beispiel in der Ethereum Blockchain zum Einsatz kommt. Im Folgenden wird daher die Praxis und Literatur zur Umweltbewertung von POW und POS dargestellt. Zum Schluss werden außerdem allgemein gültige Methoden vorgestellt. Es ist wichtig zu beachten, dass Ethereum 2022 auf POS gewechselt hat und zuvor POW im Einsatz hatte. Deshalb ist in älteren Quellen bei Ethereum der POW-Algorithmus referenziert, welcher einen bedeutend höheren Energieaufwand hat.

#### Methoden für die Messung der Umweltwirkung von Ethereum (POS)

Ethereum besteht aus einem Netz von Computern, die verschiedene Software (Clients) ausführen. Bei POS-Konsensmechanismus müssen Validatoren eine Einlage hinterlegen (32 ETH, ca. 65.000 EUR<sup>7</sup>). Steht ein Validator nicht zur Verfügung, wenn er an der Reihe ist, oder sollte ein Betrug festgestellt werden, wird ein Teil seiner Einlage einbehalten. Um an der Validierung teilnehmen zu können und als (Full-)Node zu gelten muss ein Computer zwei verschiedene, grundsätzlich unabhängige, Clients ausführen: (1) einen Execution Client (Ausführungs-Client) und (2) eine Consensus Client (Konsens-Client). Ersterer empfängt neue Transaktionen, führt Smart Contracts lokal aus und verwaltet den aktuellen Zustand aller Ethereum-Daten. Letzterer implementiert den Konsensmechanismus, um auf der Grundlage der validierten Daten des Ausführungs-Clients ein Konsens mit den anderen Nodes zu erzielen. Ausgangspunkt für die Umweltbewertung sind bei sämtlichen Methoden somit die Softwarenutzung und teils die Hardwarespezifikation von Nodes (vgl. CCAF 2023b).<sup>8</sup>

Eine der beliebtesten Quellen für den Energieaufwand von Blockchain-Netzwerken ist der Blockchain Network Sustainability Index (CCAF 2023b; nachfolgend CCAF). Es ist ein laufendes Projekt, das vom Team des Cambridge Digital Assets Programme (CDAP) am Cambridge Centre for Alternative Finance entwickelt und gepflegt wird. Auf ihrer Webseite bieten sie u.a. ein Dashboard bzw. eine Analyse zum Energieaufwand von Bitcoin und Ethereum an. Zudem weisen sie die jeweils verwendete Methodik, den Vergleich mit anderen Industrien und die geschätzten CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen aus. Ihre Berechnungen für Ethereum basieren auf einer Studie des Crypto Carbon Rating Institut (nachfolgend CCRI) aus dem Jahr 2022, das ebenfalls für verschiedene Blockchains Umweltwirkungen schätzt.

Die Studie, die dem CCRI und dem CCAF zugrunde liegt (CCRI 2022), schätzt für die Nutzungsphase den Energieaufwand sowie die CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen der Ethereum-Blockchain jeweils vor und nach der Umstellung auf den POS-Konsensmechanismus. Die Autoren messen den Energieaufwand hierbei direkt an einzelnen Nodes, wobei sie verschiedene Soft- und Hardware-Konfigurationen berücksichtigen (siehe auch Abschnitt 2.1.5). Ausgangspunkt der Analyse ist eine Reihe von Hardwarekonfigurationen, für die der Energieaufwand für jede

---

<sup>7</sup> Per 1.1.2024.

<sup>8</sup> Der Ausführungs-Client, ist für die Ausführung und Bündelung von Transaktionen sowie für die Verwaltung des Zustands zuständig. Der Konsens-Client ist für die Teilnahme an der Konsensmechanismus zuständig (CCRI, 2022). Der Konsens-Client empfängt den vorgeschlagenen Block von den anderen Konsens-Clients bzw. verteilt seinen vorgeschlagenen Block, wenn der Validatoren-Client für Validierung ausgewählt wird. Ein einzelner Node besteht in den meisten Fällen aus allen drei Clients, wird aber nur zufällig und selten für die Validierung ausgewählt. Aus diesem Grund und in Anlehnung an der Cambridge Studie betrachten wir nur den Energieaufwand, der durch den Konsens- und Ausführungs-Client verursacht wird, aber nicht denjenigen, der durch eine Validierung verursacht wird.

Kombination aus Konsens-Client und Ausführungs-Client gemessen wird.<sup>9</sup> Die Messung ist hierbei im laufenden Betrieb mit einem Mstrom Wifi Switch vorgenommen. Dieser misst nicht nur den effektiven Energieaufwand, sondern überwacht auch die Umgebungstemperatur.

Das CCAF und das CCRI nutzt diese Werte dann als Input für ihre Berechnungen. In Kombination mit Daten zum verwendeten Mix der effektiv eingesetzten Hardware und Clients schätzt das CCAF und CCRI den durchschnittlichen Energieaufwand der Ethereum-Blockchain. Da der Mix der eingesetzten Hardware und Software schwierig zu ermitteln ist, weisen die beiden Plattformen zusätzlich zu dieser „besten Schätzung“ eine Unter- und Obergrenze aus.

Um danach die CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen zu ermitteln, verwenden sie länderspezifische Emissionsintensitätsdaten von carbonfootprint.com und wenden diesen auf den berechneten Energieaufwand an (Carbon Footprint 2023a; Carbon Footprint 2023b). Für Länder, für welche diese Daten nicht vorhanden sind, benutzen sie basierend auf den Angaben der International Energy Agency (IEA) einen globalen Durchschnittswert von 459 g CO<sub>2</sub> eq. /kWh (Carbon Footprint 2022; IEA 2023b). Das IEA selbst berechnet die CO<sub>2</sub> eq. Emissionsintensität der einzelnen Länder mittels Ökobilanz (IEA 2023c). Aus dem gesamten Stromverbrauch des Netzwerks und aus dem durchschnittlichen Emissionsintensität des Ethereum-Netzwerkes wird dann die CO<sub>2</sub>-Bilanz hergeleitet.<sup>10</sup>

Die Methoden des CCRI und CCAF sind fast identisch und unterscheiden sich nur bei der Auswahl des Mixes der verwendeten Hard- und Software. Neben dem CCRI und dem CCAF ist auch der Digiconomist zu nennen (digiconomist.net 2023, nachfolgend Digiconomist). Digiconomist ist eine Internetseite von de Vries (vgl. auch de Vries 2019). Die Webseite verwendet grundsätzlich eine ähnliche Methode wie das CCAF und das CCRI, wobei für den Energieaufwand der einzelnen Nodes eine andere Quelle zugrunde gelegt wird (beaconcha.in 2023) und für die Umrechnung in CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen einfach der globale durchschnittliche Emissionsfaktor aus den Berechnungen der IEA verwendet wird.

Die Methodik der bisherigen Schätzungen ist daher ähnlich aufgebaut und kann grundsätzlich auch für diese Studie übernommen werden. Allen Abschätzungen ist jedoch gemein, dass sie sich nur auf die Nutzungsphase beziehen und die Herstellungsphase nicht berücksichtigen. Weitere Umweltwirkungen wurden unseres Wissens bisher nicht berechnet. Beides ist bei der Ausarbeitung der Methodik zu berücksichtigen.

### **Methoden für die Messung der Umweltwirkung von Bitcoin (POW)**

Beim POW-Konsensmechanismus der Bitcoin-Blockchain stehen die sogenannte Hash-Funktion und die Hashrate im Vordergrund. Die Miner versuchen ein kryptografisches Rätsel zu lösen, indem sie mittels Trial & Error-Prinzip immer wieder die Hash-Funktion berechnen, bis sie ein gewünschtes Resultat gefunden haben. Derjenige Miner der das kryptographische Rätsel am schnellsten löst, erhält als Belohnung neue Bitcoins. Im Vergleich zu Ethereum stehen bei Bitcoin deshalb Rechenleistungen und nicht Einlagen im Vordergrund, entsprechend sind die Geräte und deren Effizienz von größerer Bedeutung. Der Wettbewerb um die schnellste Rechenleistung hat dazu geführt, dass heutzutage spezialisierte Mining-Geräte verwendet werden. Mit zunehmender Anzahl Miner sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass ein einziges Mining-Gerät einen gültigen Block finden kann, und deswegen schließt sich ein Teil der Miner jeweils in sog. Mining-Pools zusammen. Zudem entstanden auch Mining-Farmen, wo hunderte von Mining-Geräten gleichzeitig schürfen. Um eine möglichst hohe Effizienz zu erreichen, ist bei Bitcoin der

---

<sup>9</sup> Um die Anzahl Tests zu verringern, berechnen sie den inkrementellen Stromverbrauch für die beiden relevanten Softwares separat und kombinieren diese dann später in der Auswertung.

<sup>10</sup> Nebst der Studie weist das CCRI auf ihrer Webseite aktuelle Schätzungen zu Energie und CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen für verschiedene Blockchains aus (crypto-carbonrating.com 2023).

wesentliche Prozess i.d.R. in die Hardware integriert, weshalb die Spezifikation der Software eine untergeordnete Rolle spielt. Für den Energieaufwand ist somit maßgebend, wie viele Berechnungen (die Hashrate), mit welcher Hardware (Hardware-Mix) durchgeführt wird. Für die CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen ist zudem der Durchführungsort der Berechnung bestimmend.

Diverse Autoren beschäftigten sich bereits mit der Umweltwirkung von Bitcoin. Unter anderem auch die bereits genannten Forschungsplattformen CCRI, CCAF und der Digiconomist. Für die Ermittlung des Energieaufwands stützen sich die Plattformen auf die Methodik des CCAF.<sup>11</sup> Dieses ermittelt den Energieaufwand von Bitcoin, in dem sie den Mix der Mining-Hardware approximieren. Diese wird basierend auf den maximalen Einsatzdauer und der Rentabilität der verschiedenen Mining-Geräte durchgeführt. Der Hardware-Mix wird mithilfe einer Gewichtung anhand des Erscheinungsdatums präzisiert, da ältere Geräte weniger profitabel sind und somit weniger genutzt werden. Der so ermittelte Mix wird mit einer Schätzung zur Anzahl der Berechnungen und mit dem Energieaufwand der einzelnen Geräte gemäß Herstellerangaben kombiniert, um den Energieaufwand des Netzwerkes zu schätzen. Die ermittelten Energieaufwände werden dann mit Miner-Standortdaten<sup>12</sup> und CO<sub>2</sub> eq.-Emissionsfaktoren je Land kombiniert (gem. CCAF), um die CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen zu berechnen.<sup>13</sup> Für ersteres stützen sich alle auf CCAF, für letzteres verwenden die Forschungsplattformen unterschiedliche Datenquellen (diese werden im Kapitel 2.1.5 näher betrachtet).

Die Autoren weisen zudem hypothetische untere und obere Grenzwerte aus. Bei den Energieaufwänden beruht der untere Grenzwert auf der Annahme, dass Miner stets die energieeffizienteste Hardware verwenden, während der obere Wert das Gegenteil annimmt. Bei den CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen berechnet das CCAF zudem Grenzwerte mittels Annahme unterschiedlicher Energiequellen (Kohle bzw. Wind).

Auch Coinshares (2022) schlägt eine Methodik vor, welche die CO<sub>2</sub> eq. -Bilanz des Bitcoin Netzwerkes berechnet. Die Berechnungsmethodik nutzt mehrere Faktoren und betont die Bedeutung der indirekten Emissionen, da Bitcoin keine direkten Emissionen generiert, sondern diese lediglich über den Stromverbrauch und die verwendete Hardware erzeugt.<sup>14</sup> Analog zur Logik des CCAF schlagen sie vor, dass Faktoren wie die Effizienz des Netzwerkes (Terahash pro Joule), die CO<sub>2</sub> eq.-Bilanz, die verwendete Hardware, die Hashrate, der Stromverbrauch und die Standorte der Miner ermittelt werden sollten. Um die Effizienz des Netzwerkes zu ermitteln, bestimmen sie zuerst die Mining-Hardware-Verteilung und berechnen basierend auf Herstellerangaben zur Effizienz einen durchschnittlichen Faktor. Für die weitere Berechnung nehmen sie an, dass die Hardware gleichmäßig auf alle Mining-Regionen verteilt sind und ermitteln so Werte für den globalen Energieaufwand und CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen. Bei den Zahlen zur Hardware wird auf eine eigene Datenbank mit Mining-Hardware zugegriffen, welche auf einer Kombination aus verschiedenen Quellen beruht. Für die vorliegende Analyse ist die Studie von Coinshares allenfalls relevant, da gewisse Aspekte aus der Berechnungsmethodik übernommen werden können und konkrete Zahlen über die verwendete Mining-Hardware aufgeführt sind.

---

11 Vgl. CCRI (2022) und de Vries et al (2022).

12 Die Miner-Standortdaten basieren auf eine repräsentative Stichprobe von Bitcoin Mining Pools-Betreibern, die die Standortdaten der einzelnen Miners mittels API sammeln.

13 Ein Teil der Autoren nutzen CO<sub>2</sub> - andere CO<sub>2</sub> eq.-Emissionsfaktoren. Für eine diesbezügliche Übersicht vgl. die Methodologie Beschreibung des CCAF (2023a und 2023b).

14 Direkte Emissionen sind Scope-1 Emissionen, die aus Quellen stammen, die direkt von einem Unternehmen kommen. Indirekte Emissionen sind Scope-2 und Scope-3 Emissionen. Scope-2 Emissionen sind indirekte Emissionen aus eingekauftem Strom, Dampf, Wasser, etc. und eine der häufigsten Emissionsarten. Scope-3 Emissionen werden entlang der Wertschöpfungskette eines Unternehmens von diversen Akteuren erzeugt. Die Messung dieser Emissionen ist äußerst aufwendig (Baumann 2022).

Köhler und Pizzol (2019a) messen den Energie- und Ressourcenaufwand mittels einer Ökobilanz (Life-Cycle Assessment; LCA). Die nähere Erläuterung zu dieser allgemein gültigen, nicht spezifisch für Blockchain entwickelte Methode, befindet sich in der untenstehenden Box. Eine Beschreibung für deren Anwendung auf Bitcoin befindet sich weiter unten.

### Ökobilanz (Life-Cycle Assessment; LCA)

Die Methode des Life-Cycle Assessments (auf Deutsch: Ökobilanzierung) wird verwendet, um die Umweltwirkungen eines Produktes über den gesamten Lebensweg zu quantifizieren. Die Abbildung 4 nach dieser Box, veranschaulicht beispielhaft die verschiedenen *Produktlebenszyklusphasen*.

#### Vorgehen bei einer Ökobilanzierung

Eine Ökobilanzierung gem. Finnveden et al. (2009) besteht aus vier verschiedenen Phasen: (1) Zielsetzung, (2) Lebenszyklus-Inventarisierung (LCI), (3) Lebenszyklus-Auswirkungs-Analyse (LCIA) und die (4) Interpretation der Resultate. (vgl. auch Ecochain 2023)

(1): Bei der **Zielsetzung** werden die Wirkungskategorien und die Rahmen der Analyse festgelegt. In dieser Phase wird auch die **funktionelle Einheit**, die durch das Produkt entsteht und einen Nutzen stiftet, definiert.

(2): Die **Lebenszyklus-Inventarisierung** befasst sich mit den Eingängen und Ausgängen eines Produkts oder einer Dienstleistung von/zu der Umwelt. Solche Ein- und Ausgänge können Rohmaterialien, Elektrizität, Wasser oder auch diverse Emissionen umfassen. Diese ist im Wesentlichen die Datenerfassungsphase der Ökobilanzierung. Die Daten, die verwendet werden, sind primäre (direkt gesammelte, rohe Messdaten) oder sekundäre Daten (von Anderen gesammelt). Ein häufig verwendeter Datensatz in der Ökobilanzierung ist der ecoinvent-Datensatz, der über 18.000 Datensätze für verschiedene Produkte enthält.

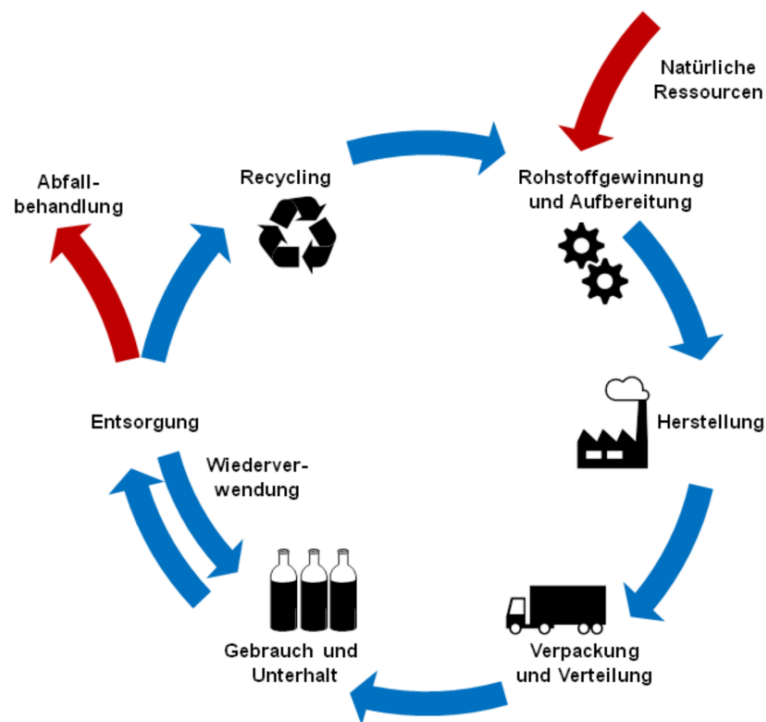
(3): Nach der Erforschung der Materialströmen, kann die **Lebenszyklus-Auswirkungs-Analyse (LCIA)** durchgeführt werden. Das Ziel dieser Phase ist es, die Signifikanz und Größe der potenziellen Umweltwirkungen der Produktlebenszyklus zu quantifizieren und zu verstehen. Konkret wird das Lebenszyklusinventar die einzelnen Wirkungskategorien zugeordnet. Darauffolgend werden die Äquivalente der verschiedenen Emissionen, die die gleiche Umweltauswirkung mit sich ziehen berechnet, und sie werden zu Gesamtwirkungssummen aufsummiert. Solche Gesamtwirkungssummen können das Erderwärmungspotenzial (CO<sub>2</sub>-Äquivalent in kg), das Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (R11-Äquivalent in kg), das Versäuerungspotenzial von Böden und Gewässern (SO<sub>2</sub>-Äquivalent in kg) oder das Eutrophierungspotenzial (PO<sub>4</sub>-Äquivalent in kg) umfassen.

(4): In der **Interpretationsphase** werden die Ergebnisse in Bezug auf das Ziel der Ökobilanzierung ausgewertet und darauffolgend Empfehlungen formuliert.

Die Methode der Ökobilanzierung wird trotz ihrer hohen Komplexität und Datenlastigkeit breit verwendet und wurde auch als ISO-Standard in der Norm ISO 14040 /14044 festgelegt.<sup>15</sup>

<sup>15</sup> Abhängig davon, welche Schritte des Lebensweges in der Ökobilanzierung erfasst werden, können zwischen verschiedenen Typen der Ökobilanzierung unterscheiden werden: (1) Cradle-to-grave: Analyse entlang der gesamten Lebenszyklus von Rohstoffbeschaffung bis zur Entsorgung; (2) Cradle-to-gate: Die Analyse erfasst nur die Schritte vor der Auslieferung zum Endverbraucher; (3) Cradle-to-cradle: Erfasst dieselben Schritte eines Produktlebenszyklus, aber es wird angenommen, dass das Produkt am Ende ihres Lebens statt weggeworfen zu werden, recycelt wird.

Abbildung 4: Lebenszyklus eines Produkts



Quelle: Bundesamt für Umwelt, BAFU (2023).

In der vorliegenden Studie wird ebenfalls ein **Life-Cycle-Assessment** in Betracht gezogen. Die Analyse von Köhler und Pizzol (2019a) betreffend Bitcoin wird deshalb nachfolgend vertieft beschrieben. Köhler und Pizzol (2019a) identifizieren als Hauptursache des Energieaufwands die verwendete Mining-Hardware (ASICs) und untersuchen deshalb deren Umweltwirkung. Hierfür berücksichtigen sie drei Phasen, die Herstellungs-, die Nutzungs- und die „End-Of-Life“-Phase. Die Umweltwirkung der Nutzungsphase ermitteln sie in dem sie den Stromverbrauch der ASIC-Geräte gem. den Herstellerangaben (vgl. z.B. [asicminervalue.com](http://asicminervalue.com)) sowie der geographischen Verteilung der Miner, hochrechnen. Die geografische Verteilung bestimmen die Autoren basierend auf Studien von Benediksen et al. (2018) & Rauchs et al. (2018) und eigenen Recherchen über Mining Pools.<sup>16</sup> Zusätzlich zu den Herstellerangaben nehmen sie für die Kühlung und weitere Zusatzverluste einen Energieaufwand von 5% des Gesamtverbrauchs, also eine Power Usage Effectiveness (PUE)<sup>17</sup> von 1,05. Diese Annahme basiert auf Expertengespräche und Pool-Statistiken gem. Stoll et al. (2019). Die Umweltwirkung des Strommixes beziehen sie aus dem ecoinvent-Datensatz.<sup>18</sup> Für die Herstellungs- und End-of-Life-Phasen verknüpfen sie die Gewichtsangaben der Hersteller mit dem ecoinvent-Datensatz, wobei sie gewichtsangepasste Werte für Desktop Computer<sup>19</sup> als Approximation verwenden. Für die Lebensdauer nehmen sie einen Wert von 1,5 Jahren, basierend auf de Vries (2019), an. Mittels LCA-Analyse berechnen sie, dass die Energieaufwände praktisch ausschließlich in die Nutzungsphase (>99%) fallen. Die Sensitivitätsanalysen zeigen zudem, dass der Strommix starken Einfluss auf die Ergebnisse hat.

<sup>16</sup> Mehr dazu befindet sich im Supplemental Information der Studie Köhler und Pizzol (2019b).

<sup>17</sup> Eine Kennzahl aus der Rechenzentrumsbranche.

<sup>18</sup> Daten zu „Allocation at the Point of Substitution“.

<sup>19</sup> Daten zu „Desktop Computer without Screen“ bzw. „Mechanical treatment of user desktop computer for 1 kg of equipment“.

Die Studie von Stoll et al. (2019) erlangt an Bedeutung aufgrund der Entwicklung einer eigenständigen Methode zur Bestimmung der geografischen **Verteilung der Miner, eine Herausforderung** bei der Messung der Umweltwirkung von Bitcoin. Stoll et al. (2018) untersuchen den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Bitcoin mithilfe einer Methode, die auf IPO-Antragstellungen von Hardwareherstellern und Mining-Daten basiert. Sie analysieren die Marktanteile der drei wichtigsten ASIC-Hersteller und ermitteln dadurch die Verteilung dieser Geräte am gesamten Bitcoin-Netzwerk. Sie klassifizieren die Miner in große, mittlere und kleine Kategorien und schätzen ihren Stromverbrauch sowie ihren Netzwerkanteil. Die geografische Zuordnung von Minern und Mining-Pools erfolgt anhand von IP-Adressen und Server-IPs. Die Berechnung des Energieaufwands erfolgt mit Ober- und Untergrenzen. Die Untergrenze basiert auf der Annahme, dass alle Miner die effizienteste Hardware verwenden, während die Obergrenze von Faktoren wie dem Bitcoin-Marktpreis und den Stromkosten abhängt. Der Kohlenstoffbilanz wird schließlich anhand des Gesamtstromverbrauchs und geografischer Daten ermittelt, indem der Verbrauch mit den durchschnittlichen und marginalen Emissionsfaktoren der Stromerzeugung multipliziert wird.

Die meisten Studien betrachten ausschließlich Bitcoin und **analysieren andere POW-Blockchains** nicht. Eine Ausnahme ist z.B. die Studie von Krause und Tolaymat (2018), die ihre Methode auf vier verschiedene POW-Blockchains anwenden. Diese Methode wird später von Gallersdörfer et al. (2020) erweitert, um grobe Schätzungen für weitere POW-Blockchains zu liefern. Im folgenden Abschnitt wird die Methode von Krause und Tolaymat (2018) vertiefter erläutert. Krause und Tolaymat (2018) ermitteln den Energiebedarf für vier POW-Blockchains: Bitcoin, Ethereum (damals POW), Litecoin und Monero. Ihre Berechnungen basieren auf öffentlich verfügbare Daten und Marktpreisen. Zunächst bestimmen sie den Energieaufwand des Netzwerks, dann pro *erzeugtem* USD-Wert. Schließlich schätzen sie dessen CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen. Um den Energieaufwand pro Blockchain-Netzwerk zu ermitteln, multiplizieren sie den Energieaufwand einer durchschnittlichen Mining-Hardware mit der täglichen Hashrate, wobei Aufwände für Kühlung etc. nicht berücksichtigt werden.

Hierbei verwenden Sie ebenfalls Herstellerangaben und stützen sich auf einen Gerätemix analog CCAF-Methodik (vgl. oben). Anschließend berechnen Sie den Energieaufwand für *neu* generierte Blockchain Werteinheiten (Coins). Dann berechnen sie die Energiekosten pro neu erzeugtem 1-USD-Wert. Hierbei teilen sie den ermittelten Energieaufwand der Blockchain durch den Wert aller in einer Stunde neu generierten Coins in USD. Sie vergleichen ihre Berechnungen mit den Ergebnissen, die sie für Edelmetalle erhalten. Schließlich ermitteln sie die CO<sub>2</sub>-Emissionen der einzelnen Blockchains pro erzeugtem Coin, indem sie länderspezifische CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren auf den Energiebedarf anwenden. Bei der Berücksichtigung der geografischen Verteilung der Miner verwenden die Autoren als Untergrenze den kanadischen Emissionsfaktor und als Obergrenze den indischen Emissionsfaktor. Zusammenfassend widmet sich die Studie von Krause und Tolaymat dem Energieaufwand und dem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck in Bezug auf die Erzeugung von einem USD-Wert. Die Untersuchung bietet nicht nur einen Vergleich zwischen verschiedenen POW-Blockchains, sondern auch einen Vergleich mit klassischen Alternativen wie Edelmetallen.

### **Gleichzeitige Bewertung von POW und POS**

Schliesslich gibt es Bewertungen, deren Methodik nicht Konsensmechanismus-spezifisch sind. Cali et al. (2023) analysieren verschiedene Konsensmechanismen hinsichtlich ihres Energieaufwands und betrachten spezifische Anwendungsfälle im Energiesektor. Die Autoren argumentieren, dass die Verbreitung von Proof-of-Stake und Proof-of-Authority (POA) mit Blick auf die Energie- und Ressourcenaufwände erwünscht und sinnvoll ist. Diese Forschung ist für die vorliegende Studie dahingehend relevant, als dass sie eine Einordnung der verschiedenen

Protokolle für die Energiebranche liefert. Die Forschenden verwenden dabei die Studie von Platt et al. (2021) für die konkreten Zahlen zum Energiebedarf der Protokolle.

Platt et al. (2021) präsentieren eine Methodik zur Bewertung des Energieaufwands pro Transaktion verschiedener Blockchain-Protokolle wie Ethereum, Algorand, Cardano, Polkadot, Tezos, Hedera, und Bitcoin. In Ibañez (2023b) wird diese Analyse weiter detailliert und erneuert. Die Autoren vergleichen 16 verschiedene Blockchain-Lösungen sowie das Netzwerk des Zahlungsanbieters Visa (VisaNet). Das Resultat ist in einer Tabelle zusammengefasst (Abbildung 5). Die Spalten der Tabelle zeigen den globalen Energieverbrauch gemessen in Kilowatt (kW), den Energieverbrauch pro Transaktion, gemessen in Kilowattstunde (kWh), die Transaktionen pro Sekunde (TPS) und die Anzahl der Validatoren/Nodes (Validators) auf. Die Tabelle zeigt insbesondere, dass Bitcoin sowohl absolut als auch pro Transaktion mit Abstand am meisten Energie benötigt. Der Vergleich verdeutlicht den signifikanten Unterschied im Energieverbrauch zwischen POW- (Bitcoin) und POS-Blockchains (alle weiteren). Bitcoin verarbeitet vergleichsweise wenige Transaktionen pro Sekunde mit einer sehr großen Anzahl von Minern, was dessen Energieverbrauch pro Transaktion und auch in der Gesamtbetrachtung hochtreibt. Demgegenüber verarbeiten die POS-Blockchains, wie Ethereum oder Hedera, eine große Anzahl von Transaktionen pro Sekunde und verbrauchen trotzdem vergleichsweise wenig Energie. Das Beispiel von Hedera demonstriert zudem, dass die Anzahl von Validatoren neben dem Konsensmechanismus einen signifikanten Einfluss auf den Energieverbrauch pro Transaktion ausübt. Die POS-Blockchain Hedera mit 27 Validatoren benötigt pro Transaktion 975 Mio Mal weniger Energie als die POW-Blockchain Bitcoin mit über 10.000 Validatoren. Basierend auf diesen Vergleichen und Berechnungen fordern die Autoren eine Modernisierung von POW-Systemen und eine Verlagerung hin zu POS. Dieser Mechanismus könnte den Energiebedarf traditioneller zentraler Zahlungssysteme unterbieten und somit einen positiven Beitrag zur Bekämpfung des Klimawandels leisten. Für die vorliegende Studie und die entwickelte Methodik sind diese Publikationen zentral, da sie konkrete Verbrauchszahlen für den Energiebedarf verschiedener Blockchain-Protokolle liefern.

**Abbildung 5: Analyse der Energieverbräuche verschiedener DLT-Protokolle auf Transaktionsebene**

DLT	Global power consumption (kW)	Energy consumption/tx (kWh)	TPS	Validators
Algorand	106.82	0.003411	8.70	1,227
Avalanche	101.62	0.002395	11.79	1,209
Bitcoin	92, 325, 000, 000.00	2.927	2.56	10, 000+
BNB Chain	7.02	0.000059	33.4	56
Cardano	142.63	0.041270	0.96	1,209
Elrond/				
MultiversX	277.76	0.102875	0.75	3,200
Ethereum	450.15	0.009956	12.56	5,294
Flow	37.15	0.003318	3.11	428
Hedera	6.45	0.000003	568.45	26
Near	13.71	0.000602	6.33	158
Polkadot	16.66	0.035593	0.13	297
Solana	917.29	0.000517	493.00	2,512
Tezos	29.81	0.009203	0.90	407
Toncoin	21.18	0.001948	3.02	244
Tron	391.92	0.001202	33.40	56
VisaNet	1, 736.00	0.003280	1,736	n/a

Table II

Quelle: Ibañez (2023b).

## Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es bereits etablierte Bewertungsmethoden gibt. Die meisten Methoden basieren auf dem gleichen Prinzip: Zunächst wird die Größe und Zusammensetzung des (dezentralen) Netzes abgeschätzt, anschließend wird der Energieaufwand des Netzes berechnet. Schließlich wird aus einer geschätzten geografischen Verteilung der CO<sub>2</sub> eq. Fußabdruck der Nutzungsphase berechnet. Die Methoden unterscheiden sich also nur in der Schätzung von Größe, Zusammensetzung und geographischer Verteilung, wobei die Schätzmethoden von CCAF und CCRI jeweils am genauesten zu sein scheinen. Mit Ausnahme einer eher trivialen Schätzung für Bitcoin berücksichtigt keine der verwendeten Methoden die Herstellungsphase, also auch nicht die von CCAF und CCRI. Folglich unterschätzen die Methoden die diesbezüglichen Umweltauswirkungen. Zudem handelt es sich bei den Berechnungen nur um Schätzungen, da aufgrund der Dezentralität keine Informationen über die verwendete Hardware und die Standorte der Computer vorliegen.

### 2.1.4 Aktueller Wissensstand über der Ressourcen- und Energieaufwände von DLT-Lösungen

Der Ressourcen- und Energieaufwand von Blockchain-Anwendungen, insbesondere von Bitcoin und anderen Kryptowerten, ist ein wichtiges Thema in der aktuellen DLT-Literatur und Forschung. Es existieren bereits einige Studien, die Ressourcen und Energieaufwände quantifizierten. Diese beschäftigen sich in den meisten Fällen mit Bitcoin oder Ethereum, den beiden bekanntesten Blockchains. Die untenstehende Tabelle gibt eine Übersicht über die Resultate der wichtigsten Studien. Sie veranschaulicht, dass je nach Durchführungsjahr und Studie, die Schätzungen der jährlichen CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen<sup>20</sup> sehr unterschiedlich ausfallen können:

**Tabelle 6: Zusammenstellung veröffentlichter Treibhausgasemissionsschätzungen für diverse Blockchains**

Blockchain	Zeitperiode	Ø Verbrauch in Mio. t CO <sub>2</sub> eq./a	Min Verbrauch in Mio. t CO <sub>2</sub> eq./a	Max Verbrauch in Mio. t CO <sub>2</sub> eq./a	Quelle
Ethereum, Litecoin, Monero	1/2016-6/2018	0,4	0,1	0,6	Krause und Tolaymat 2018
Bitcoin	1/2016-6/2018	3,2	1,2	5,2	Krause und Tolaymat 2018
Bitcoin	2018	17	-	-	Köhler and Pizzol (2019a)
Bitcoin	2018	22	22	23	Stoll et al. (2019)
Bitcoin	2018	24	19	30	de Vries (2019)
Bitcoin	2021	65	-	-	de Vries et al. (2022)
Bitcoin	2023	63	-	-	CCRI 29.09.2023

<sup>20</sup> Ein Teil der Autoren berechnen CO<sub>2</sub>- andere CO<sub>2</sub> eq.-Emission. Für eine diesbezügliche Übersicht vgl. CCAF (CCAF 2023a).

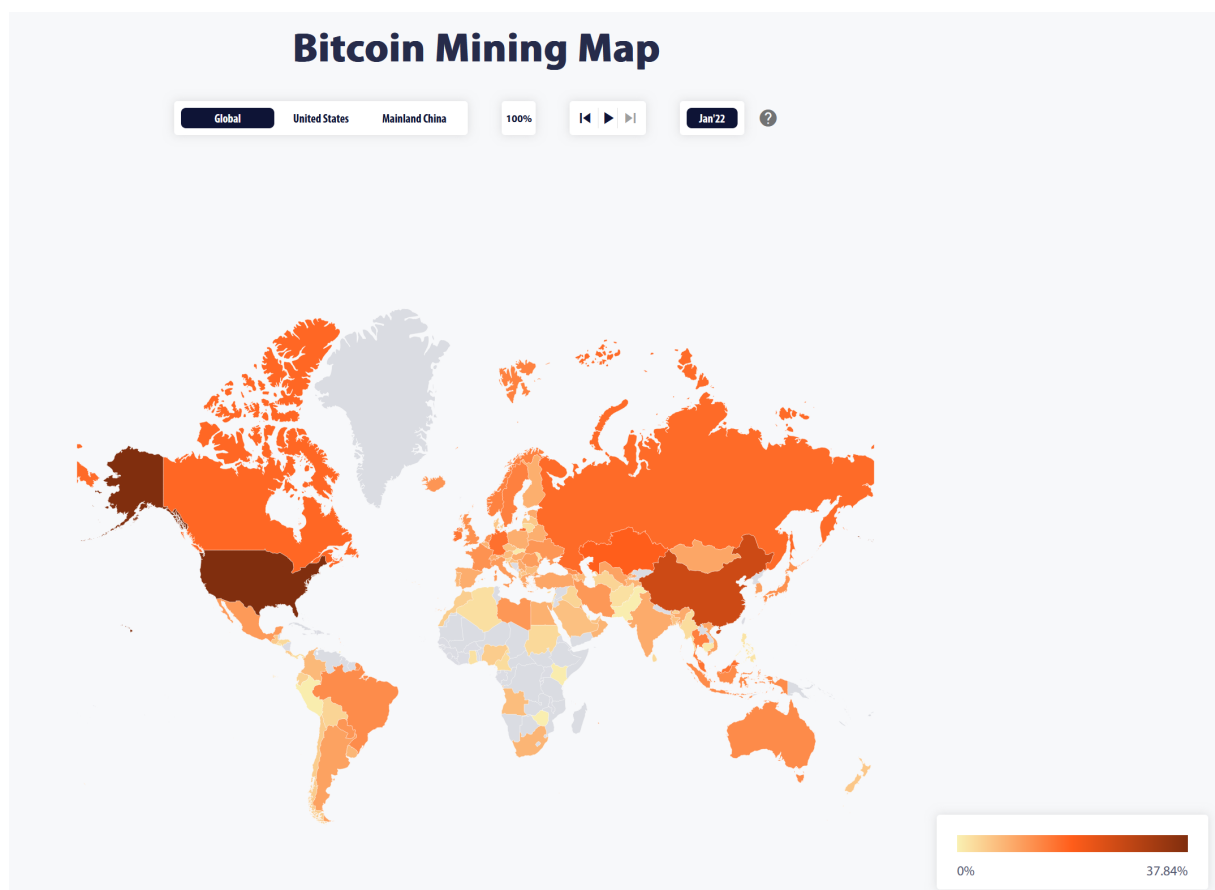
Blockchain	Zeitperiode	Ø Verbrauch in Mio. t CO <sub>2</sub> eq./a	Min Verbrauch in Mio. t t CO <sub>2</sub> eq./a	Max Verbrauch in Mio. t CO <sub>2</sub> eq./a	Quelle
Bitcoin	2023	65	2,7	128	CCAF 29.09.2023
Bitcoin	2023	68			Digiconomist 29.09.2023
Dogecoin	2023	2,1			CCRI 29.09.2023
Dogecoin	2023	1,3	-	-	Digiconomist 29.09.2023
Ethereum (POW)	2022	30			Digiconomist 29.09.2023
Ethereum (POW)	2022	11,1	-	-	CCRI (2022)
Ethereum (POS)	2022	0,0009	-	-	CCRI (2022)
Ethereum (POS)	2023	0,0026	-	-	CCRI 29.09.2022
Ethereum (POS)	2023	0,01	-	-	Digiconomist 29.09.2023

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf OSTP (2022), CCRI (2022), CCRI, CCAF, Digiconomist.

Wie oben bereits erläutert, stammt einer der anerkanntesten Berechnungen vom CCAF. Aktuell (26.04.2024) weist das CCAF für Bitcoin einen Wert von 20,08 GW bzw. 89,2 Millionen t CO<sub>2</sub> eq. aus. Für Ethereum berechnet es zudem einen Wert von 630,86 kW. Diese Zahlen bewegen sich im Rahmen der neueren Studien (vgl. Tabelle 6), wobei das CCAF auch auf die Methodik dieser aufbaut.

Zusätzlich zu den oben genannten Studien ist die Forschung von Dionysopoulos et al. (2022) nennenswert, die den Energieaufwand von Bitcoin-Mining in der EU untersucht. Das EU Blockchain Observatory and Forum Team stützt sich hierbei auf sekundäre Ressourcen und Daten wie den Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI) des CCAF (2023b) und verknüpfen diesen mit Energieaufwandsdatenbanken zur EU von datacommons.org. Die Autoren identifizieren insbesondere Herausforderungen bei der Datenerhebung, da die Daten zu Hashrate und Energieaufwand nicht leicht zugänglich sind und ihre Glaubwürdigkeit schwierig zu verifizieren ist. Zudem verzerren Miner, die ihre Standorte verschleiern, die Daten. Trotz der groben und unvollständigen Natur der verfügbaren Daten wurden im Laufe der Analyse durch empirische Beweise unterstützte Trends beobachtet. Der Bericht dient jedoch weniger als abschließender Beweis, sondern vielmehr als Anstoß für eine Diskussion über den Energieaufwand von Proof-of-Work in der EU und den Bedarf an höherwertigen Daten.

Abbildung 6: Volumen des Bitcoin-Minings nach Hashrate (2022)



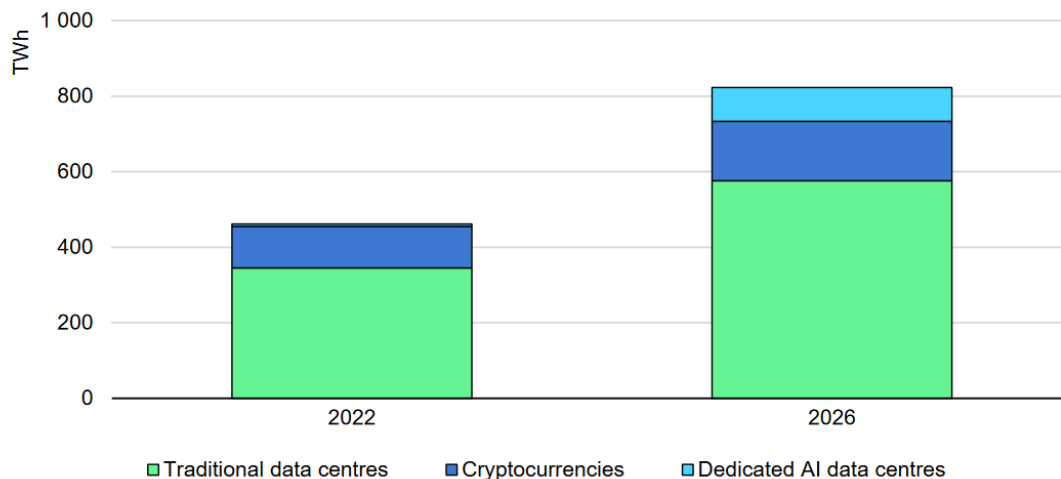
Quelle: CCAF.

Hinweise: 1) Die Karte wurde zuletzt im Januar 2022 aktualisiert; 2) Die Autoren gehen davon aus, dass die Zahl für Deutschland überschätzt ist, da keine größeren Mining-Aktivitäten in Deutschland bekannt sind. Das ungefähre Bild über die Zeit (Verschiebung von China zu Amerika) ist aber konsistent mit anderen Quellen.

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Vergleichen der Umweltwirkungen von Blockchain mit denen von Ländern, Produkten oder Dienstleistungen. Das CCAF (2023a) vergleicht beispielsweise die annualisierten Treibhausgasemissionen von Bitcoin (75,02 Mio. t CO<sub>2</sub> eq.) mit Youtube (10 Mio. t CO<sub>2</sub> eq.), (weiteren) Datenzentren (127 Mio. t CO<sub>2</sub> eq.), Goldminen (100 Mio t CO<sub>2</sub> eq.) oder Klimaanlage (1.950 Mio. t CO<sub>2</sub> eq.). Die IEA stellt zudem die Stromaufwände in einen globalen Vergleich. In Anlehnung an den Bericht von Woods et al. (2022) schätzen sie z.B. den Stromaufwand von Klimaanlage im Jahr 2022 auf 10%, von Datenzentren (inkl. Blockchain und AI) auf 2% und von Blockchain auf 0,4% (IEA 2023d). Die Blockchains („Cryptocurrencies“) sind global somit ca. für etwa ein Viertel des Stromaufwands aller Rechenzentren verantwortlich. Die IEA prognostiziert hierbei eine Verdopplung des Stromaufwands der Rechenzentren von 2022 bis 2026, wobei auch von einem Wachstum bei den Blockchains ausgegangen wird (vgl. Abbildung 7, IEA 2024).

**Abbildung 7: Geschätzter Strombedarf von herkömmlichen Rechenzentren, speziellen KI-Rechenzentren und dem Betrieb verschiedener Blockchains**

**Estimated electricity demand from traditional data centres, dedicated AI data centres and cryptocurrencies, 2022 and 2026, base case**



IEA. CC BY 4.0.

Note: Data centre electricity demand excludes consumption from data network centres.

Sources: IEA forecast based on data and projections from [Data Centres and Data Transmission Networks](#); Joule (2023), Alex de Vries, [The growing energy footprint of artificial intelligence](#); Crypto Carbon Ratings Institute, [Indices](#); Ireland Central Statistics Office, [Data Centres Metered Electricity Consumption 2022](#); and Danish Energy Agency, [Denmark's Energy and Climate Outlook 2018](#).

Quelle: International Energy Agency Bericht Electricity 2024, S. 35.

**Treiber der Energieaufwände und Treibhausgasemissionen**

Diverse Studien untersuchen zudem direkt oder indirekt die Treiber von Energie- und Treibhausgasemissionen.

CCRI und de Vries (2023) zeigen auf, dass der Konsensmechanismus maßgeblich den Energieaufwand und somit die Emissionen einer Blockchain bestimmt. Sie zeigen z.B., dass die Umstellung der Ethereum-Blockchain von POW zu POS den Energieaufwand um 99,8% reduzierte. Dies weil POW als Sicherheit große Rechenkapazitäten verlangt, während POS auf Vermögenswerte setzt. Entsprechend resultieren sehr unterschiedliche Umweltwirkungen für die beiden Konsensmechanismen.

Bekannt ist zudem, dass Entscheidungen von Unternehmen und Regierungen den Wert von Kryptowerten beeinflussen und somit indirekt ihren Energieaufwand ebenfalls steuern. Auch die breite Öffentlichkeit kann durch Akzeptanz oder Ablehnung bestimmter Technologien Einfluss auf den Energieaufwand nehmen. Erste Initiativen diesbezüglich wurden mit der MiCA-Verordnung (Markets in Crypto-Assets) oder politischen Initiativen, zum Beispiel in Irland (Avan-Nomayo 2021) angestoßen.

Ähnlich wie bei der Elektromobilität erzeugen DLT-Netzwerke vor allem **indirekte Emissionen**, die stark von der Art der Stromerzeugung abhängen. Die Umweltwirkung wird also primär durch den Strommix beeinflusst. Schätzungen zum Stromverbrauch von Bitcoin variieren deshalb erheblich und können bis zu 100% Unterschied aufweisen.

Die Einführung neuerer, stromeffizienter Geräte hat ebenfalls zu Veränderungen im Energieaufwand geführt (CVJ 2023). Die Berechnungen und Daten, welche von der Universität

Cambridge bereitgestellt werden, können deshalb zum Beispiel auf Grund der **Lokalisierung von Minern fehleranfällig sein**. Ihre Methode basiert auf der Annahme, dass der Standort der IP-Adresse, die ein Miner zur Verbindung mit seinem Pool verwendet, mit seinem tatsächlichen geografischen Standort übereinstimmt. Dies kann zu falschen Positivmeldungen in Gebieten führen, die häufig für VPNs oder Proxy-IP-Adressen verwendet werden. Es existiert auch eine bemerkenswerte Zuweisung von der **Hashrate** an „Global Other“, einen undefinierten globalen Standort, der Kohlenstoff mit der durchschnittlichen globalen Intensität emittiert (Coinshares 2022).

Als weiterer Treiber wird von de Vries (2019) der Grundlastbedarf genannt. Der Autor argumentiert, dass POW den Grundlastbedarf im Netz erhöht und somit auch bei Verwendung eines hohen Anteils erneuerbarer Energiequellen erhebliche Umweltwirkungen mit sich bringt. Erneuerbare Energiequellen liefern keine konstante Strommenge, und im Falle von Fluktuationen muss der erhöhte Grundlastbedarf mit Energiequellen wie Gas oder Kohle bedient werden. Diesbezüglich herrscht aber keine Einigkeit. Ein Hauptfaktor, der den Energieaufwand von Bitcoin von den anderen Branchen unterscheidet, ist die Tatsache, dass Bitcoin überall und jederzeit „ge-mined“ werden kann. Diese Eigenschaft ermöglicht theoretisch die Nutzung von Energiequellen, die für andere Anwendungen unzugänglich oder zu unregelmäßig sind. Deshalb wird in der Literatur Bitcoin als Möglichkeit für den Ausgleich des Grundlastbedarfs genannt (vgl. z.B. Bruno et al 2023, Carter 2021, Fridgen et al. 2021, KPMG 2023 und Bogensperger et al 2018b und die Webseite von Terahash 2023b). Vereinzelt gibt es auch praktische Beispiele, bei denen dies unter spezifischen Gegebenheiten umgesetzt wurde (CNBC 2023). Bei unerwartet niedriger Nachfrage oder überschüssigem Angebot ermöglicht Mining einen gezielten Stromverbrauch, um die Balance zwischen Angebot und Nachfrage herzustellen. Dies kann dann Nutzen stiften, wenn keine adäquaten Energiespeicherlösungen vor Ort verfügbar sind und die Mining-Hardware nicht vollständig ausgelastet ist. Umgekehrt kann bei hoher Nachfrage das Mining zum gleichen Zweck auch gezielt unterbrochen werden. Dies ist möglich, wenn die Kompensation des Miners für die Abstellung höher ausfällt als seine erwarteten Gewinne durch Mining. In Deutschland wird in der Diskussion um einen Ausbau von Regelenergie hauptsächlich der Einsatz von Wärme- und Elektrolyselasten betont, die ansonsten ungenutzt blieben – sei es wegen zu hohen Stromkosten oder nicht rentabler Investitionen (BMWK 2023). Zur ökonomischen und praktischen Durchführbarkeit des Minings zur Unterstützung des Lastenausgleichs in Deutschland, insbesondere im Vergleich zu Wärme- und Elektrolyselasten, gibt es jedoch noch keine wissenschaftlichen Studien. Aus Umweltsicht müsste bei der Bewertung des Bitcoin-Minings zur Unterstützung der Regelenergie zudem der häufige Austausch der Mining-Hardware und die damit verbundene Entstehung großer Mengen an Elektroschrott berücksichtigt werden.

## Stromnetze und Regelenergie

Stromnetze ermöglichen die Übertragung und Verteilung elektrischer Energie und sind somit von zentraler Bedeutung für die Bereitstellung von Strom. Voraussetzung für das Funktionieren eines Stromnetzes ist aber, dass die Frequenz im Netz zu jedem Zeitpunkt gleichbleibt. Im Niederspannungsnetz beispielsweise muss die Netzfrequenz innerhalb enger Toleranzbereiche immer exakt 50 Hertz betragen (Bundesnetzagentur, 2023b). Strom kann jedoch nicht in großen Mengen effizient gespeichert werden, deshalb müssen sich in einem Stromnetz zu jedem Zeitpunkt Stromproduktion und Stromverbrauch in einem Gleichgewicht befinden, um die Stabilität des Netzes zu garantieren.

Diese Koordination von Stromproduktion und -Verbrauch geschieht auf den kurzfristigen Strommärkten, auf denen mehrheitlich 24-Stunden im Voraus gehandelt wird (der sogenannte *Day-Ahead Markt*). Da aber teilweise selbst wenige Minuten im Voraus Produktion oder Verbrauch nicht immer präzise genug antizipiert werden können, greifen die *Netzbetreiber* auf das Angebot von *Regelenergieanbietern* zurück. Regelenergie gleicht als Reserve sehr kurzfristige Schwankungen im Stromnetz aus (innerhalb von Sekunden und Minuten). Bei *positiver Regelenergie* wird zusätzlicher Strom ins Netz eingespeist oder Stromverbrauch reduziert, bei *negativer Regelenergie* wird die Stromproduktion reduziert und somit weniger Strom ins Netz eingespeist oder der Verbrauch erhöht (Bundesnetzagentur, 2023a).

Historisch waren vor allem ungeplante Ausfälle von Kraftwerken, sowie Abweichungen der Stromnachfrage vom erwarteten Wert die größte Herausforderung. Die wechselhafte Einspeisung der erneuerbaren Energieträger Windkraft und Photovoltaik hat jedoch zu einem wachsenden Bedarf an Regelenergie geführt.

## Weitere mindernde Effekte

Beispiele und die Literatur zeigen außerdem, dass es weitere Anwendungsfälle gibt, die darauf abzielen, Umweltwirkungen zu reduzieren. Bitcoin-Miner können sich beispielsweise dafür entscheiden, in erneuerbare Energiequellen zu investieren. Dies bietet besonders dort Potenzial, wo der Anteil erneuerbarer Energiequellen bereits hoch ist.<sup>21</sup> In den USA überwiegt jedoch die zusätzliche Nutzung fossiler Energieträger durch Miner den Einsatz erneuerbarer Energien. Zwar können Bitcoin-Miner in den USA ihre Bilanz dadurch verbessern, insgesamt stoßen sie jedoch trotzdem mehr CO<sub>2</sub> aus.<sup>22</sup>

KPMG (2022) nennt zudem die Wiederverwendung der durch die Mining-Geräte generierte Hitze, um Liegenschaften oder Gewächshäuser zu heizen. Analog zu einigen Rechenzentren-Beispielen, wie das vom Windcloud 4.0 GmbH (UBA 2022) können Mining-Farmen ihren Strom aus ihren eigenen erneuerbaren Energiequellen beziehen oder sogar die generierte Abwärme für diverse CO<sub>2</sub>-neutrale oder sogar CO<sub>2</sub>-senkende Zwecke nutzen, um ihre Umweltbilanz zu verbessern.

Gas-Flaring wird ebenfalls als weiteren Grund gennant (KPMG 2022). Beim Gas-Flaring wird das Methangas, das bei der Ölförderung oder anderen industriellen Prozessen freigesetzt wird, verbrannt, damit diese nicht in die Atmosphäre gelangt. Indem Krypto-Mining mit Gas-Flaring kombiniert wird, kann das Methangas in Energie umgewandelt und genutzt werden. Krypto-

21 Bekannt sind Beispiele aus Paraguay, El Salvador und Teile von Kanada. Vgl. auch die Praxis-Beispiele von Roland Berger (2023) und Terahash.space (2024) und auch versch. Literatur, Velicky (2023); Niaz H. & Liu (2022), Bastian-Pinto et al. (2021), Fridgen et al. (2021) und KPMG (2023).

22 Vgl. Bruno et al (2023).

Mining stellt hierbei einen Anreiz dar, um das Methangas nicht in die Atmosphäre gelangen zu lassen, sondern zu verbrennen, um dadurch Energie zu generieren, die wiederum in Form von Elektrizität in die Mining-Geräte eingespeist werden kann. Es ist jedoch wichtig zu erwähnen, dass in der langen Frist (Klimaziele 2050), das Gas nicht nur verbrannt, sondern eingefangen und transportiert werden sollte. Dies weil das Gas-Flaring selbst zu hohen Emissionen führt (allein im Jahr 2022 500 Mio. t CO<sub>2</sub> eq.). Entsprechend bietet Mining nur so lange einen Mehrwert, bis Methan nicht eingefangen & transportiert werden kann (IEA 2023a; World Bank 2023).

### Entwicklung der Energieaufwände und Treibhausgasemissionen

Wenn es zur Vorhersage der Entwicklung zukünftiger Energieaufwände für Blockchain kommt, so entbrennt darüber ein kontrovers geführter Streit. In Coroamă (2021 und 2022) wird aufgezeigt, dass der Energieaufwand von POW-Blockchains 1) unabhängig von der Energieeffizienz der Mining-Hardware ist und 2) nur vom Preis abhängt.

In der Vergangenheit sind zwar die Geräte für POW-Mining massiv effizienter geworden.<sup>23</sup> Der Wettbewerb zwischen den Minern hat aber gleichzeitig dazu geführt, dass mehr Berechnungen notwendig sind, um Blöcke zu validieren. Coroamă (2021 und 2022) geht für Bitcoin davon aus, dass im Gleichgewicht (alle Miner nutzen die effizienteste Mining-Hardware) die Nachfrage nach Berechnungen in gleichem Ausmaß wie die Effizienzsteigerung steigt. Dies entspricht aus Sicht der Miner einem sog. „Rebound“-Effekt von 100%. Die Stärke des „Rebound“-Effekts bzw. das Mining-Angebot hängt zudem im Wesentlichen vom Preis ab, da die Anzahl an Transaktionen und Belohnungen begrenzt sind. Miner erhöhen das Angebot, wenn ihr erwarteter Umsatz steigt, der sich aus Gebühren und Belohnungen zusammensetzt. Da die Menge an Blöcken pro Zeiteinheit per Definition fixiert ist, hängt das Angebot primär vom Preis und der Entwicklung der Belohnungen ab. Erstere halbieren sich alle vier Jahre, letztere steigen mit der Nachfrage nach Bitcoin. Wie sich der Energieaufwand in CO<sub>2</sub>-Emissionen überträgt, bzw. wie sich die CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen entwickeln, ist jedoch umstritten. Daten von Woobull (2023), Bitcoin-Analyst, zeigen für Bitcoin z.B., dass die Anzahl Berechnungen zugenommen hat, ohne dass dabei die CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen gewachsen sind. Diese Daten bzw. die Methodik konnten jedoch noch nicht verifiziert werden, da sie nicht öffentlich verfügbar sind.

Ein Teil der Befürworter der Blockchain-Technologie erkennt dann auch an, dass es ein Umweltproblem gibt. In Anlehnung an das Pariser Klimaabkommen wurde der Crypto Climate Accord von verschiedenen privaten Akteuren ins Leben gerufen. Seine beiden Hauptziele sind Netto-Null-Emissionen durch den Stromverbrauch der Unterzeichner und die Entwicklung von Standards, Tools und Technologien, um den Übergang zu 100% erneuerbaren Blockchains zu beschleunigen. Nach eigenen Angaben hat die Initiative die Unterschriften von mehr als 150 Unternehmen, von denen jedoch keines ein sehr großer Akteur ist (cryptoclimate.org 2023).

### Zusammenfassung

Aus der Literaturrecherche geht insbesondere hervor, dass POS im Vergleich zu POW deutlich weniger Umweltressourcen benötigt. Dies weil es Vermögen statt Energie als Sicherheit einsetzt.<sup>24</sup> Diesem Umstand ist bei der Auswahl der Anwendungen sowie der Methodik zwingend Rechnung zu tragen.

<sup>23</sup> Mining-Geräte über die Zeit veränderten sich: von Central Processing Unit (CPU), zu Graphic Processing Unit (GPU) danach zu Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs) und schlussendlich zu Geräten, die nur noch eine spezialisierte Aufgabe lösen können, die Application-Specific Integrated Circuits (ASICs).

<sup>24</sup> Daraus kann aber nicht darauf geschlossen werden, dass POS Pareto-effizient ist. Der Proof-of-Work Konsensmechanismus benötigt deutlich mehr Energie als Alternativen wie Proof-of-Stake, die ein höheres Sicherheitsniveau bieten (Bundesnetzagentur, 2021).

### 2.1.5 Vorhandene Datensätze bezüglich der Umweltwirkung von DLT-Lösungen

Die Methodik unterscheidet sich grundlegend basierend auf die angewendete Konsensmechanismus, zwischen Bitcoin (POW) und Ethereum (POS). Die bereits erwähnte Studie der CCAF gibt einen guten Überblick über vorhandene Datengrundlagen und dient deshalb als Ausgangspunkt. Nachfolgend werden deshalb die verwendeten Datenquellen des CCAF beschrieben und mit Weiteren ergänzt. Bei der genauen Ausarbeitung der Methodik wird die Anwendbarkeit dieser Datensätze evaluiert. Weitere Datensätze werden ggf. aus anderen Quellen zu unsere Datengrundlage hinzugefügt.

#### Ethereum-Datensätze

Zur Ermittlung des gesamten Energieaufwands und weiterer Umweltwirkungen sind Daten zu Anzahl Nodes, zur Verteilung der verwendeten Hardware und Clients (siehe auch 2.1.3) und zum Energieaufwand dieser notwendig. Hierfür verwendet das CCAF-Daten von MigaLabs (monitoreth.io 2023), Ethernodes (ethernodes.org 2023) sowie Messungen aus der CCRI-Studie (2022).

MigaLabs aggregiert Daten zur Client-Verteilung, zum Standort, zum verwendeten Betriebssystem, zur Anzahl Nodes, zur Anzahl Nodes per IP-Adresse und zu der geographischen Verteilung der Nodes. Für die Anzahl Nodes kann alternativ auch auf Etherscan abgestützt werden.

Auf Ethernodes befinden sich Daten zur Client-Verteilung. Zudem bietet Ethernodes eine Übersicht zur Nutzung von Rechenzentren (wie auch rated.network 2023). Für die Client-Verteilung kann auch auf clientdiversity.org (2023) abgestützt werden, die verschiedene Datenquellen zusammenfasst.

Ebenfalls hilfreich ist Etherscan, eine On-Chain Datenbank. Sie weist Daten zu den Anzahl Nodes, zu deren geografischen Verteilung und auch zu der Verteilung der Clients auf.

Das CCRI bietet Daten zum Stromverbrauch verschiedener Hardware und Client-Typen an. Diesbezüglich sind uns keine weiteren Datenquellen bekannt.

Weitere nützliche Datenseiten und Websites sind die offiziellen Dokumentationen von Ethereum Foundation. Die Tabelle 7 fasst die bisher identifizierten Datenquellen zu Ethereum zusammen.

Das CCAF führt zudem keine Ökobilanz durch. Für diesbezügliche Daten kann auf die verwendeten Daten der GCC-Studie (UBA 2021) verwiesen werden, die mit obigen Daten zur Soft- und Hardware verknüpft werden können.

**Tabelle 7: Datenübersicht Ethereum**

Datenpunkt / Sekundärquelle	CCAF <sup>25</sup>	Ethereum Foundation	Weitere
Anzahl Nodes	monitoreth.io (2023)	etherscan.io (2023)	
Geografische Verteilung von Nodes		etherscan.io (2023); nodewatch.io (2023)	monitoreth.io (2023); ethernodes.org (2023)
Verteilung der Ausführung-Client Typen	monitoreth.io (2023)	ethernodes.org (2023)	monitoreth.io (2023)
Verteilung der Konsens-Client Typen	ethernodes.org (2023)	clientdiversity.org (2023)	blockprint (GitHub.com) (2023)
Energiebedarf in Leerlauf	CCRI (2022)	-	Für einzelne Nodes (Total): beaconcha.in (2023)
Energiebedarf Ausführung-Clients	CCRI (2022)	-	Für einzelne Nodes (Total): beaconcha.in (2023)
Energiebedarf Konsens-Clients	CCRI (2022)	-	Für einzelne Nodes (Total): beaconcha.in (2023)
Hardware-Spezifikation	CCRI (2022)	Minimum Anforderung der einzelnen Clients: ethereum.org (2023a)	

Quelle: CCAF, Ethereum Foundation und eigene Recherchen.

## Bitcoin Datensätze

Bei der Umweltbewertung von Bitcoin sind v.a. Daten zur Anzahl Berechnungen (Hashrate), zur verwendeten Hardware, sowie der Miningstandort für die Ermittlung der Umweltwirkung, relevant. Je nach Berechnung kommen unterschiedliche Datensätze zur Anwendung.

Eine der wichtigsten Metriken ist die Hashrate, welche die Anzahl der Berechnungen, die von den Minern durchgeführt werden, wiedergibt. Das CCAF nutzt hierfür Daten von coinmetrics.io. Als weitere Datenquellen kommen z.B. blockchain.com oder chainbulletin.com in Frage.

Für die Hardwarespezifikationen und deren Strombedarf kann grundsätzlich auf die Angaben der Hersteller verwiesen werden. Verschiedene Quellen aggregieren auch diese Daten.<sup>26</sup> Ebenfalls findet sich z.B. auf dem Bitcoin-Wiki (2023) eine Zusammenstellung der Hardware-Komponenten von ASIC-Geräten. Da diese aus spezifischen Computer-Chips bestehen, sind für ihre Komponenten keine Primärdaten imecoinvent-Datensatz bzw. in der GCC-Studie enthalten.

Für den Verteilung der Geräte auf dem Netzwerk gibt es kaum direkte Quellen, weshalb in der Literatur i.d.R mittels Profitabilitäts-Ansatzes versucht wird, die Verteilung zu approximieren (vgl. Abschnitt 2.1.3).

Der Profitabilitäts-Ansatz beruht auf Daten zum Einkommen und Kosten der Miner. Hierfür bieten sich diverse Quellen an. Standardisierte und gut verifizierte Daten zum Einkommen bietet z.B. coinmetrics.io (2023c) an. Für die Kosten kann auf die Schätzung des CCAF zurückgegriffen werden. Alternative Quellen für die Kosten bzw. zu Profitabilität gibt es zudem auf diversen Online-Plattformen.<sup>27</sup>

Alternative Datenquellen für eine direktere Ermittlung der ASIC-Geräte Verteilung sind Marktanteile der Hersteller oder Nonce-Analysen, wie von Coinmetrics (Helmy et al. 2023) beschrieben. Die Datenqualität dieser Quellen ist aber umstritten.

Für die Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses sind die geografische Verteilung der Miner und der Energie-Mix in den jeweiligen Ländern relevant. Hierbei wurden insbesondere die Datenquellen des CCAF und Stoll et al. (2018) identifiziert. Diese nutzen unterschiedliche Ansätze über IP-Adressen, wobei CCAF diesen von Miningpools erhält und die Resultate somit weniger stark von „verschleierte“ IP-Adressen verzerrt sind. Weitere Daten hierzu gibt es z.B. von bitnodes.com (2023). Daten zum Energie-Mix pro Land sind z.B. imecoinvent-Datensatz, von datacommons.org (2023) oder von de Vries et al. (2022) erhältlich. Zusätzliche Daten zu CO<sub>2</sub> eq.-Emissionsfaktoren je Energiequelle finden sich z.B. in National Renewable Energy Laboratory (2021).

Die nachfolgende Tabelle 8 gibt eine Übersicht der bisher identifizierten Datensätze zu Bitcoin.

### Zusammenfassung

Datensätze zur Umweltbewertung sind grundsätzlich vorhanden. Schwierigkeiten bzw. Herausforderung bzgl. der Datenqualität bestehen jedoch in folgenden Punkten: (1) Welche Software und Hardware werden im Durchschnitt verwendet und wo befinden sich die Geräte (2) Welche abiotischen Ressourcen benötigen einzelne Bitcoin-Miner? (3) Wie hoch ist der Stromverbrauch der einzelner POW-Nodes? Bei der Ausarbeitung der Methodik sollten diese Punkte deshalb speziell berücksichtigt werden.

26 Z.B. Die Webseiten Asic Miner Value und Minerstat.

27 Z.B. Die Webseiten Asic Miner Value und Minerstat.

**Tabelle 8: Datenübersicht Bitcoin**

Datenpunkt / Sekundärquelle	CCAF <sup>28</sup>	Weitere
Belohnung	coinmetrics.io (2023a)	-
Durchschnittlicher Bitcoin Netzwerk Hashrate	coinmetrics.io (2023b)	blockchain.com (2023); chainbulletin.com (2023)
Stromverbrauchseffektivität (PUE)	Schätzung (CCAF)	GCC-Studie (Umweltbundesamt 2021)
Verteilung der ASIC-Typen im Netzwerk	Gewichtung der Gerätetypen basierend auf Erscheinungsdatum und aktuellem Datum (CCAF)	Nonce-Analyse von Helmy et al. (2023) Marktanteilsanalyse von Stoll et al. (2018)
Transaktionsgebühren	coinmetrics.io (2023c)	
Effizienz der Mining-Ausrüstung	Dynamische Schätzung abgeleitet von 100 verschiedenen Geräten, basierend auf Herstellerinformationen und Expertenaussagen: CBECI 2024	asicminervalue.com (2023); minerstat.com (2023) oder Herstellerinformationen, z.B.: bitmain.com (2023)
Strompreis	Globale Schätzung (CCAF)	-
Strommix	-	datacommons.org (2023); de Vries (2022); ecoinvent (2022)
Geografische Verteilung der Miners	Hochrechnung von einer repräsentativen Stichprobe von Miners (CCAF)	Pool-Server IP, IP der Mining-Geräte, IP-Adresse der Miners bitnodes.io (2023); chainbulletin.com (2023b); blockchain.com (2023);

Quelle: CCAF und eigene Recherchen.

28 Cambridge Center for Alternative Finance.

### 2.1.6 Fazit

Aus der Literaturrecherche lassen sich insbesondere folgende Erkenntnisse gewinnen:

- ▶ Die Ökobilanz-Methoden aus der KPI4DCE-Studie und der GCC-Studie sind weitgehend für DLT anwendbar und bieten daher eine passende Grundlage für die vorliegende Analyse. Die Studien des UBA bilden somit eine essenzielle Grundlage zur Beurteilung der Umweltauswirkungen von DLT.
- ▶ Trotz bestehender Herausforderungen weist DLT ein Potenzial für den Umweltschutz und den Energiesektor auf. Insbesondere durch die Automatisierung und Schaffung von Transparenz kann DLT zum Umweltschutz beitragen.
- ▶ Es gibt bereits Methoden zur Umweltbewertung von DLT, wobei die meisten Autoren nur den Energieaufwand während der Nutzungsphase der DL-Technologie messen. Ökobilanzen sind im Bereich DLT bis anhin kaum angewandt worden. Die bestehende KPI4DCE-Methodik lässt sich aber gut erweitern.
- ▶ Vorhandene Umweltbewertungen zeigen klare Unterschiede zwischen den Konsensmechanismen. POS (Ethereum) benötigt im Vergleich zu POW (Bitcoin) deutlich weniger Umweltressourcen, was entsprechend bei der Methodik und der Auswahl der Anwendungsfälle berücksichtigt werden sollte.
- ▶ Verfügbare Daten zur Umweltbewertung sind grundsätzlich vorhanden. Herausforderungen bzw. Unschärfen bestehen besonders in Bezug auf den Mix der Netzwerkteilnehmer.

## 2.2 Auswahl der relevanten Anwendungsfälle

Im Rahmen dieser Analyse wurden verschiedene Blockchain-Anwendungen im Hinblick auf den Umweltschutz und aus regulatorischer Perspektive miteinander verglichen. Um eine möglichst repräsentative Auswahl zu treffen, die sowohl den aktuellen Stand und die Möglichkeiten der Technologie als auch die verbreitetsten Anwendungen abdeckt, wird auf wissenschaftliche Literatur und Gespräche mit Vertreterinnen und Vertretern des Umweltbundesamtes zurückgegriffen.

Bei der Auswahl der Anwendungsfälle werden zudem folgende zentrale Kriterien erfüllt:

- ▶ Die Anwendungsfälle sollen sowohl aktuell als auch zukünftig von hoher **Relevanz** sein;
- ▶ Es wird angestrebt, sowohl **positive** als auch **negative** Beispiele und Aspekte abzudecken;
- ▶ Die **technologische Breite** von DLT-Anwendungen sollte berücksichtigt werden, daher sollte ein Schwerpunkt auf technologische Aspekte, die einen (voraussichtlich) großen „Impact“ auf die Umwelt haben können gelegt werden (wie z.B. bestimmte Konsensmechanismen) und es sollten möglichst viele unterschiedliche Technologien abgedeckt werden;

Um Umweltauswirkungen auf seriöse Weise bewerten zu können, wird die Vergleichbarkeit mit geeigneten nicht-DLT-basierten Alternativen sichergestellt. Insbesondere zwei zentrale technologische Charakteristika von Blockchains werden berücksichtigt: „permissioned“ vs. „permissionless“ sowie Proof-of-Work (POW) vs. Proof-of-Stake (POS). Auf einer „permissioned“ Blockchain ist der Zugang und die Teilnahme am Konsensmechanismus eingeschränkt und nur nach expliziter Zustimmung möglich. Eine „permissionless“ Blockchain im Gegenzug ist öffentlich zugänglich und es steht jedem Nutzer frei einen Node zu betreiben. Die vier von uns gewählten Anwendungsfälle können entsprechend in dieses simple Schema eingeordnet werden:

**Tabelle 9: Technologische Einordnung der Anwendungsfälle**

Konsensmechanismus	Permissioned	Permissionless
Proof-of-Work	—	Bitcoin
Proof-of-Stake/ Proof-of-Authority	P2P-Energiemärkte	Ethereum, Sustainable Finance

Quelle: eigene Darstellung.

Im Folgenden werden die vier ausgewählten Anwendungsfälle diskutiert, ihre Auswahl begründet und die für die jeweilige Anwendung vorgesehene nicht-DLT-basierte Alternative vorgestellt. Die Auswahl wurde in Zusammenarbeit mit dem UBA getroffen.

## 2.2.1 Bitcoin – Vertreter der POW-Blockchains

### Begründung der Auswahl

Bitcoin gilt bis heute als vielleicht **wichtigster Kryptowert** und ist ein Paradebeispiel für die Umsetzung und Anwendung von DLT. Bitcoin verwendet eine eigene Blockchain, in der Transaktionen gespeichert werden und digitale Vermögenswerte als sogenannte Coins repräsentiert sind – unter Coins versteht man einen Kryptowert mit eigener, dezidierter Blockchain.

Ein zentraler Aspekt von Bitcoin ist der Konsensmechanismus des Proof-of-Work. Bei POW müssen Miner komplexe mathematische Rätsel lösen, um Transaktionen zu validieren und das Recht zu erhalten, den nächsten Block der Blockchain hinzuzufügen. Die Komplexität der mathematischen Rätsel und damit die nötige Rechenleistung ist im Falle Bitcoins im Laufe der Zeit stark gestiegen, was zeigt, dass POW beträchtliche Umweltauswirkungen haben kann. Der resultierende hohe Energieaufwand und die damit verbundenen CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen haben zu Bedenken hinsichtlich der Umweltauswirkungen von Bitcoin und ähnlichen Blockchains geführt. Dieser Zusammenhang muss aber nicht gegeben sein: die Komplexität des Bitcoin-Minings wird an die eingesetzten Ressourcen im Mining-Netzwerk angepasst und sollten diese fallen, dann sinkt auch die nötige Rechenleistung.

Die Wichtigkeit und der Einfluss von Bitcoin als erste und bis heute größten Kryptowerts der Welt, sowie die Nutzung eines POW-Konsensmechanismus legen es nahe, Bitcoin zu analysieren.

### Die nicht-DLT-basierte Alternative

Prinzipiell können Bitcoins (im Sinne einer Währung) als Tauschmedium, Zahlungsmittel oder als Wertaufbewahrungsmittel angesehen werden. Je nach Fokus liegen unterschiedliche Vergleiche nahe, was zu unterschiedlichen Ergebnissen der Analyse führen kann.

Der Vergleich von Bitcoin mit traditionellen Wertaufbewahrungsmitteln wie Gold wurde in der Projektgruppe diskutiert. Aufgrund der aktuell stärkeren Korrelation von Bitcoin mit Tech-Aktien wird in dieser Analyse jedoch auf einen Vergleich mit Gold verzichtet. Edelmetalle besitzen zudem einen eigenständigen Nutzen, der über ihre Funktion als Wertspeicher hinausgeht.

Bitcoin wurde ursprünglich als Zahlungsnetzwerk konzipiert und wird teilweise auch in diesem Sinne verwendet. Es kann aber auch als Investitionsvehikel eingesetzt werden. Daher wird in dieser Analyse ein Vergleich mit einem traditionellen Zahlungsnetzwerk vorgenommen. Auf Basis des Austauschs mit dem UBA wird in dieser Studie deshalb auf **Bitcoin als Transaktions-Netzwerk**<sup>29</sup> und daher auf digitale Zahlungsdienstleister, die ähnliche Dienste leisten ohne den Einsatz von DLT (beispielsweise PayPal), ein Fokus gelegt.

---

<sup>29</sup> Einzelne Länder verbieten die Nutzung von Bitcoin. Für eine Liste der Länder, in denen die Nutzung von Bitcoin illegal ist, siehe PWC (2022).

## 2.2.2 Ethereum als das wichtigste Blockchain Protokoll für Smart Contracts

### Begründung der Auswahl

Die Auswahl von Ethereum ergibt sich aus mehreren wichtigen Gründen. Erstens ist Ethereum vermutlich das bedeutendste Blockchain Protokoll im Markt, das die Grundlage für viele DLT-Anwendungen bildet. Die Ethereum-Blockchain wird nicht nur für den Kryptowert „Ether“ genutzt, sondern für eine Vielzahl von Anwendungen. Ethereum dient somit als **Plattform für DLT-Anwendungen**.

Konkret ermöglicht Ethereum die Nutzung von Smart Contracts, insbesondere solche, die den ERC20-Standard verwenden. Dieser Standard implementiert geldähnliche Tokens (Fungible Tokens). Er stellt die Grundlage für eine Vielzahl an weiteren Smart Contracts dar und implementiert die Transferfunktionalität, die Saldofunktionalität (Balance) und den Transfer im Namen anderer. Weitere wichtige Standards sind ERC721 und ERC1155, welche unteilbare Tokens (Nicht-Fungible Tokens – NFT) implementieren. Durch den Einsatz dieser Smart Contracts ermöglicht Ethereum die Tokenisierung von Vermögenswerten, was die Aufbewahrung und den direkten Handel ohne traditionelle Intermediäre ermöglicht. Dies hebt die Vielseitigkeit und den revolutionären Charakter von Ethereum im Blockchain-Bereich hervor.

Darüber hinaus ermöglichte der Wechsel von Ethereum von Proof-of-Work zu Proof-of-Stake im Jahr 2022 eine interessante Gelegenheit, diese beiden Konsensmechanismen direkt zu vergleichen und deren Vor- und Nachteile gegenüberzustellen. Die Verbreitung des POS-Konsensmechanismus, dessen Popularität und Bekanntheit mit der Umstellung des Ethereum-Netzwerkes weiter gestiegen ist, ermöglicht zudem die Anwendung von Blockchain-Technologien im Umwelt- und Klimaschutz. Die im Jahr 2021 publizierte Studie des Wuppertal Instituts „Blockchains nachhaltig gestalten“ kam zu der Schlussfolgerung, dass die neue Generation von Blockchains zumeist genauso leistungsfähig ist, wie POW-Blockchains, aber erheblich weniger Ressourcen und Energie verbraucht.

### Die nicht-DLT-basierte Alternative

Ethereum wird derzeit vor allem als Infrastruktur für dezentrale Plattformen oder Anwendungen genutzt. Viele dieser Anwendungen können durch die Nutzung zusätzlicher Dienste auch zentral betrieben werden. Der vorliegende Vergleich konzentriert sich daher auf eine zentrale Infrastruktur, also Cloud-Dienste. Dabei werden insbesondere solche Aspekte betrachtet, in denen Cloud-Dienste und Blockchain-Technologien ähnliche Funktionen bzw. Vorteile aufweisen und in bestimmten Kontexten als austauschbare Lösungen betrachtet werden können. Dementsprechend werden Bereiche wie Datenspeicherung bewusst ausgeklammert, da sie nicht zu den Kernüberschneidungen der beiden Technologien gehören. Zusätzlich stellen wir die Nutzung von Ethereum in den Kontext eines zentralen digitalen Zahlungsdienstleisters.

### 2.2.3 P2P-Energiemärkte als ein Anwendungsbeispiel im Strommarkt

#### Begründung der Auswahl

Die Dezentralisierung von Energieproduktion und Speicherung ist **eines der wichtigsten Themen im Energiemarkt**. Eine viel diskutierte Möglichkeit, dezentrale Energiequellen und Prosumenten<sup>30</sup> besser in das Stromnetz zu integrieren sind lokale Energiemärkte, auf denen Prosumenten Energie handeln können. Blockchains können hierbei genutzt werden, um Transaktionen auszuführen und zu speichern. Verschiedene DLT-basierte Anwendungen und Pilotprojekte existieren bereits (z.B. BEST Strommarkt, tal.markt, Quartierstrom) und einzelne Länder haben Energiegemeinschaften in ihre Energiegesetze aufgenommen und ihnen explizit eine Rolle im Strommarkt zugewiesen (z.B. Österreich). Die genaue Gestaltung dieser Energiemarktplattformen kann sehr unterschiedlich sein; sie reichen von autarken Gemeinschaften mit Eigenproduktion über zentral von einem Plattformanbieter bereitgestellte Handelsplattformen bis hin zu Unternehmen, die die Steuerung der dezentralen Ressourcen zentral vornehmen und Nutzer nicht aktiv eingreifen. In dieser Analyse wird der Fokus auf eine stark dezentral gestaltete Struktur von P2P-Plattformen gelegt, auf denen die einzelnen Nutzer aktiv handeln können. Dies entspricht den Blockchain-basierten Projekten, die in diesem Bereich bisher umgesetzt wurden.

Die wachsende Bedeutung dezentraler Energieproduktion und das Entstehen von gesetzlichen Grundlagen für Energieplattformen zeigt die Relevanz dieser Anwendung. Zudem bietet diese Anwendung die Möglichkeit, eine permissioned Blockchain zu analysieren, da im allgemeinen nur zugelassene Haushalte teilhaben können. In verwandten Projekten arbeiteten und forschten die Autoren dieser Studie bereits zu diesem Thema und können hier Vorwissen und Kontakte nutzen.

#### Die nicht-DLT-basierte Alternative

Als Vergleich dient ein **zentralisiertes, nicht-DLT-basiertes System für Energiehandel**. Energieplattformen können sowohl als Peer-to-Peer-Netzwerke, bei denen die Teilnehmer direkt miteinander interagieren, wie auch durch Netzwerke, die durch eine zentrale Koordinationsstelle gesteuert werden, realisiert werden. Diese Unterscheidung ist ein wichtiges Kriterium für die Analyse.

Energieversorgungsunternehmen (EVU) betreiben in vielen Fällen inzwischen **lokale, digitale Handelsplattformen**, ohne den Einsatz von Blockchain-Technologie. In Anbetracht dieser Tatsache setzen wir unsere Analyse auf der Grundlage dieses zentralisierten Vergleichsfalls um.

---

30 Konsumenten, die auch selber Energie produzieren, beispielsweise mithilfe einer Solarzelle.

## 2.2.4 Green Bonds als Beispiel für die Möglichkeiten der Tokenisierung von Vermögenswerten

### Begründung der Auswahl

Der **Finanzmarkt** stellt bisher das **Hauptanwendungsgebiet von Blockchain-Technologie** dar, wobei insbesondere die Tokenisierung von hauptsächlich illiquiden Vermögenswerten hervorsticht. Durch solche Tokenisierungsmaßnahmen werden neuartige Finanzierungsquellen erschlossen, die den Umweltschutz maßgeblich unterstützen können. Besonders interessant ist hierbei, dass die Tokenisierung Privatpersonen erstmals direkte Investitionsmöglichkeiten in Projekte wie Solaranlagen bietet – Möglichkeiten, die zuvor hauptsächlich institutionellen Investoren vorbehalten waren. In der Praxis sind bereits erste Projekte in diese Richtung erfolgreich umgesetzt worden. Ein Beispiel dafür ist GreenRock Energy, welches Green Bonds (grüne Anleihen) auf Grundlage des neuen elektronischen Wertpapiergesetzes in Ländern wie Deutschland, Österreich und Italien tokenisiert und somit auf der Blockchain handelbar gemacht hat (tokenforge 2024). Ein ähnliches Projekt wurde von Societe Generale-FORGE umgesetzt, wobei im Unterschied zu GreenRock Energy nicht nur ein Abbild des Bonds, sondern der Bond vollumfänglich als Security auf der Blockchain abgebildet ist (Societe Generale 2023). Darüber hinaus gibt es laufende Forschungsprojekte, wie jenes der BIS, die sich intensiv mit diesem Themenspektrum auseinandersetzen (Bank for International Settlements 2022).

Green Bonds ist ein weites Feld. Vorliegend soll das Thema nicht in seiner Gänze beleuchtet werden, sondern abstrakt Elemente davon im Zusammenhang mit der Tokenisierung analysiert werden. Die beiden DLT-basierten („digitalen“) Green Bonds von GreenRock Energy und Société Générale vereinfachen durch die Tokenisierung vor allem den Handel auf Sekundärmärkten. Im Vergleich zum traditionellen Bankensystem ist kein komplexes Netzwerk bilateraler Beziehungen erforderlich, um Transaktionen durchzuführen und die Eigentumsverhältnisse fälschungssicher zu dokumentieren.

In dieser Studie wird deshalb der Fokus auf die Auswirkungen des Handels auf Sekundärmärkten gelegt. Ein solcher abstrakter und fokussierter Ansatz erscheint sinnvoll, da davon auszugehen ist, dass Green Bonds künftig zugänglicher und somit häufig gehandelt werden. Des Weiteren erlaubt ein solcher Ansatz einen Vergleich mit einem zentralen Kontrahenten.

### Die nicht-DLT-basierte Alternative

Green Bonds können bereits an traditionellen Börsen gehandelt werden und sind somit keine Erfindung der Blockchain-Technologie. Der Einsatz der Distributed Ledger Technology (DLT) bringt jedoch zusätzliche Aspekte mit sich: (1.) DLT kann traditionelle Handelsplätze, also die Börse, überflüssig machen (direkter Effekt). Diese Aufwände werden dann eingespart bzw. durch DLT-Aufwände ersetzt. (2.) das Investitionsvolumen erhöhen (indirekter Effekt). Für die Umweltbewertung von Green Bonds sind somit zwei Effekte zu unterscheiden.

1. **Direkte Effekte** beschreiben den Unterschied im Ressourcenaufwand zwischen *einem* Handel von Green Bonds an einer traditionellen Börse und *einem* Handel über eine DLT-Plattform. Die direkten Effekte basieren hierbei auf der Annahme, dass das Anlage- und Handelsvolumen bei den beiden Optionen gleich hoch ist. Bei diesem Vergleich steht die Frage im Vordergrund, ob die Bereitstellung und der Betrieb einer traditionellen Börse zu geringeren Umweltauswirkungen für den Handel von Green Bonds führt oder ob die redundanten Berechnungen auf einer POS-Blockchain umweltfreundlicher sind.

2. **Indirekte Effekte** beschreiben den Effekt auf die Umwelt aufgrund des Mengeneffekts, d.h. wie sich das Investitionsvolumen aufgrund der erhöhten Liquidität verändert und wie sich das auf die Umwelt auswirkt. Hier stellt sich die Frage, ob der positive Effekt der zusätzlichen Investitionen die negativen (direkten) Effekt des Handels überwiegen. Je nachdem wie hoch die direkten Effekte sind, kann sich der indirekte Effekt positiv oder negativ auf die Umwelt auswirken.

Vorliegend konzentrieren wir uns auf die direkten Effekte, da diese einen allgemeinen Eindruck von den möglichen Umweltauswirkungen von DLT-Anwendungen vermitteln können und die Datenlage für eine Bewertung der indirekten Effekte zu dünn ist.

### 3 Umweltbewertung

In diesem Kapitel wird die Umweltbewertung der vier Anwendungsfälle von DLT-Lösungen durchgeführt. Für jede Anwendung wird kompakt die angewandte Methodik der quantitativen Analyse skizziert, darauf folgend werden die Resultate dokumentiert und eingeordnet. Die detaillierte Beschreibung des Vorgehens in der quantitativen Analyse befindet sich im Anhang A.5.

Das Kapitel ist entsprechend wie folgt gegliedert:

- ▶ Abschnitt 3.1 skizziert die Methodik in der Analyse von POW-Blockchains bzw. der Anwendung Bitcoin und dokumentiert die Resultate.
- ▶ Abschnitt 3.2 skizziert die Methodik in der Analyse von POS-Blockchains bzw. der Anwendung Ethereum und dokumentiert die Resultate.
- ▶ Abschnitt 3.3 skizziert die Methodik in der Analyse von lokalen Energiemärkten und dokumentiert die Resultate.
- ▶ Abschnitt 3.4 skizziert die Methodik in der Analyse von Sustainable Finance und dokumentiert die Resultate.
- ▶ Abschnitt 3.5 fasst die Ergebnisse der vier Umweltbewertungen zusammen.

Für die Analysen von POW-Blockchains und POS-Blockchains werden dabei jeweils die folgenden KPIs berechnet und dargestellt:

- ▶ Rohstoffaufwand (ADP): Dieser KPI bewertet die Inanspruchnahme von Mineralien und fossilen Rohstoffen. Die Einheit ist kg Antimon Äquivalente pro Jahr [kg Sb eq./a].
- ▶ Kumulierter Stromaufwand (KSA): Dieser KPI misst den für die Nutzung relevanten jährlichen Stromverbrauch, der von den Geräten benötigt wird. Die Maßeinheit ist Gigawattstunden pro Jahr [GWh/a].
- ▶ Kumulierter Primärenergieaufwand (KEA): Dieser KPI bewertet den Primärverbrauch an energetischen Ressourcen. Die Einheit ist Megajoule pro Jahr [MJ/a].
- ▶ Treibhausgasemissionen (GWP): Dieser KPI bewertet die Wirkung auf die Erderwärmung. Die Einheit ist kg Kohlendioxid Äquivalente pro Jahr [kg CO<sub>2</sub> eq./a].

### 3.1 POW-Blockchains und Bitcoin

Im Folgenden werden die Umweltauswirkungen von Bitcoin bewertet. In Abschnitt 3.1.1 wird die Methodik der quantitativen Analyse erläutert und in Abschnitt 3.1.2 werden die Ergebnisse dokumentiert. Die Ergebnisse der qualitativen Analyse werden in Anhang A.5 festgehalten.

#### 3.1.1 Methodik

Im Folgenden wird ein strukturierter Ansatz entwickelt, der sich über die gesamte Lebensdauer der Hardware erstreckt, die für das Mining eingesetzt wird. Sowohl für die Herstellungs- wie auch für die Nutzungsphase beginnt die Bewertung mit der Identifikation und Analyse der Hardware-Komponenten. Die detaillierten Daten der genutzten Hardware sind ausschlaggebend, da die spezifischen Eigenschaften der Hardware den Energieaufwand und die Effizienz des Mining-Prozesses bestimmen.

Für das Mining von Bitcoin wird spezielle Hardware genutzt, sogenannte **Application-Specific Integrated Circuits (ASICs)**. Im Gegensatz zu anderer Hardware wie beispielsweise CPUs (Central Processing Unit), die für vielfältige Aufgaben nutzbar ist, sind ASICs ausschließlich für das Lösen von Hash-Funktionen optimiert. Ihre Effizienz und Leistungsfähigkeit übertreffen die herkömmlicher Mining-Methoden erheblich, weshalb sie inzwischen fast ausschließlich für das Mining genutzt werden. In einem ersten Schritt wird daher die **Verteilung der ASIC-Modelle** im Bitcoin Netzwerk ermittelt. Wir konzentrieren uns hierbei auf die populärsten Modelle, die über 80% der Hashrate des gesamten Netzwerks repräsentieren.<sup>31</sup>

Für diese ASICs werden zunächst die Hardwarekomponenten ermittelt. Da der Stromverbrauch und damit die Stromkosten ein entscheidender Faktor für Miner sind, ist insbesondere der Stromverbrauch der einzelnen ASICs sehr gut dokumentiert. Somit kann der Stromverbrauch der relevanten Typen von ASICs bestimmt werden. Zusätzlich werden die in diesen Modellen verbauten Microchips analysiert. Diese sind kommerziell erhältlich. Konkret wird insbesondere die Die-Size der jeweiligen Microchips gemessen.

Auf Basis dieser ermittelten Werte wird dann der Green Cloud Computing-Methode gefolgt. Die **Umweltauswirkungen der Herstellungsphase** können auf Basis der Die-Size und Anzahl verbauter Microchips, den Wirkungsfaktoren pro Die-Fläche und pro Gramm Gold, sowie der Größe der Power Supply Unit der ASICs bestimmt werden. Die detaillierte Berechnungsmethode ist im Anhang 0 dieses Berichts dargestellt.

Für die **Nutzungsphase** wird die **Hashrate** in die Analyse integriert. Die Hashrate, ausgedrückt in Terahash pro Sekunde, ist ein Indikator für die Menge an Rechenoperationen, die das Netzwerk pro Sekunde durchführen kann. Sie spiegelt die Gesamtleistung des Bitcoin-Mining-Netzwerks wider und beeinflusst direkt den Energiebedarf. Anschließend wird der durchschnittliche Stromverbrauch pro Terahash für die zuvor bestimmten, populärsten ASIC berechnet, sprich, die Energieeffizienz der Mining Hardware in Joule/Terahash. Die Verteilung der unterschiedlichen Typen von ASICs multipliziert mit dem Stromverbrauch ergibt sodann den durchschnittlichen Energieaufwand pro Terahash. Die detaillierte Berechnungsmethode ist im Anhang A.2.3 dieses Berichts dargestellt.

Im nächsten Schritt wird für ein gegebenes Berechnungsdatum die durchschnittliche Hashrate des Bitcoin Netzwerks bestimmt.<sup>32</sup> Auf Basis des durchschnittlichen Energieaufwands pro Terahash ergibt sich somit eine Schätzung des gesamten Stromverbrauchs im Bitcoin Netzwerk. Zuletzt wird diese Berechnung mit Schätzungen der geografischen Verteilung der ASICs ergänzt,

---

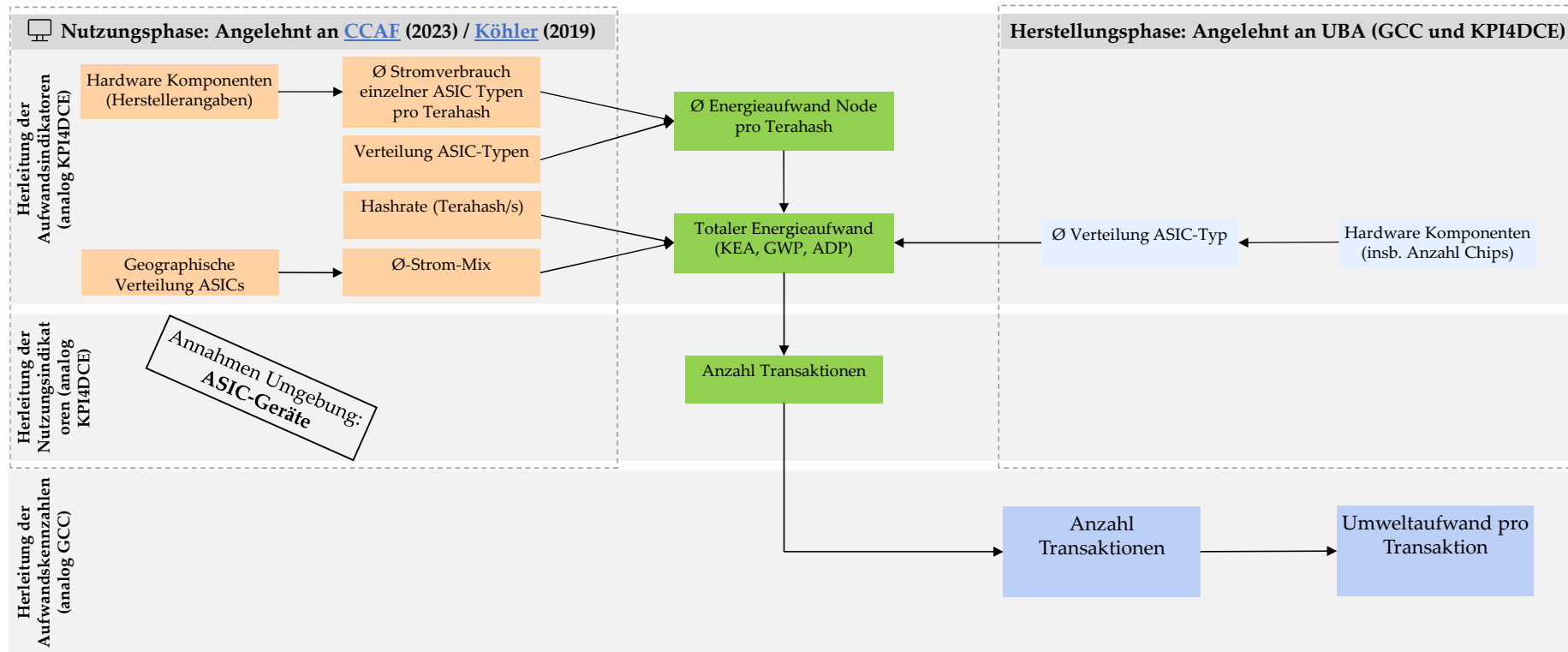
31 Es handelt sich dabei um die Modelle Bitmain Antminer S19, Bitmain Antminer S19j Pro und Bitmain Antminer S19 XP.

32 Das Berechnungsdatum für die hier dokumentierten Ergebnisse ist der 01.01.2024.

(siehe Tabelle 8) ergänzt, um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß während der Nutzungsphase bestimmen zu können.

Um final die berechneten Umweltauswirkungen einzuordnen kann der totale Energieaufwand und CO<sub>2</sub>-Ausstoss entweder in Relation zum Wert der existierenden Bitcoins oder zur Anzahl Transaktionen gesetzt werden. Ersteres würde die Umweltauswirkungen relativ zum erzielten Marktwert der Bitcoins bestimmen, zweiteres relativ zu den Fähigkeiten des Bitcoin-Netzwerks Transaktionen zu ermöglichen. Entsprechend des Austauschs mit dem UBA konzentrieren wir uns auf die **Bewertung relativ zur Anzahl Transaktionen**.

Abbildung 8: Detaillierte Schritte in der Bestimmung des Umweltaufwandes von Bitcoin



Quelle: Eigene Darstellung.

Um die Umweltauswirkungen von Bitcoin einordnen zu können, werden ebenso die Umweltauswirkungen eines digitalen Zahlungsdienstleisters geschätzt. Dieser Vergleich spiegelt den Fokus auf die Bitcoin-Auswirkungen pro Transaktion wider.

Ein passender Vergleich ist PayPal. Publikationen zufolge wurden in 2022 22,3 Milliarden Transaktionen über PayPal getätigt und insgesamt 200.300 MWh Strom verbraucht in den Rechenzentren von PayPal (PayPal, 2022). Mithilfe des GCC-Tools können somit die Umweltauswirkungen pro Transaktion bestimmt werden. Hierbei wird angenommen, dass die im KPI4DCE-Tool und der GCC-Methodik hinterlegten Charakteristika dem durchschnittlichen Rechenzentrum von PayPal entsprechen. Diese Annahme ist vermutlich nicht haltbar, aber ohne genauere Informationen über die Ausstattung der einzelnen Rechenzentren PayPals kann dies nicht überprüft werden. Der totale Stromverbrauch der Rechenzentren wird in Relation zum Verbrauch des hinterlegten Rechenzentrums im KPI4DCE-GCC Tool gesetzt, um die Anzahl Rechenzentren, sprich die Skalierung auf die Größe der Cloud Computing/Storage Plattform von PayPal, zu bestimmen.

### 3.1.2 Ergebnisse

Tabelle 10 dokumentiert die Ergebnisse der quantitativen Bewertung von Proof-of-Work (POW)-Blockchains und konkret im Beispielfall Bitcoin. Wie aufgrund des hohen Energieaufwands des „Mining“ zu vermuten war, zeigt sich, dass die Umweltauswirkungen von POW-Blockchains vor allem in der Nutzungsphase hoch sind. Nach den Kriterien GWP und KEA sind die Umweltauswirkungen während der Nutzungsphase mehr als 50-mal (GWP) bzw. über 70-mal (KEA) so groß wie während der Herstellungsphase. ADP fällt primär in der Herstellungsphase für die Produktion der ASICs und Rechenzentren an.

**Tabelle 10: Ergebnisse der quantitativen Bewertung von POW-Blockchains und Bitcoin**

	ADP (kg Sb eq./a)	KSA (kWh/a)	KEA (MJ/a) <sup>33</sup>	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq./a)
Herstellungsphase	159.496	NA	21.101.207.611	1.530.554.519
Nutzungsphase	0	144.386.484.828	1.544.935.387.656	73.162.272.346
<b>Total</b>	<b>138.078</b>	<b>144.386.484.828</b>	<b>1.566.036.595.267</b>	<b>74.692.826.865</b>
<b>Pro Transaktion</b>	<b>0,001</b>	<b>940</b>	<b>10.192</b>	<b>486</b>
<b>Pro Transaktion (PayPal; GRI)</b>	<b>NA</b>	<b>0,01<sup>34</sup></b>	<b>NA</b>	<b>0,02<sup>35</sup></b>

Quelle: Eigene Berechnungen.

Gemäß der Schätzung resultiert zurzeit ein abiotischer Ressourcenaufwand von ca. 138 t Sb eq./a, Treibhausgasemissionen von ca. 75 Mio. t CO<sub>2</sub> eq./a und ein kumulierter Energieaufwand von ca. 1.566.037 Tausend GJ/a. Diesen Berechnungen liegt ein Strommix zugrunde, der auf Basis der geographischen Verteilung des Bitcoin-Minings weltweit bestimmt

33 Die Werte für KEA werden auf der Grundlage des Primärenergiefaktors für Deutschland berechnet. Es wird der in der Green Cloud Computing Studie des UBA verfügbare Faktor verwendet: 10,7 MJ/kWh.

34 Der GRI-Bericht von PayPal (PayPal, 2022) weist für das Jahr 2022 einen Stromaufwand von 259.800 MWh (wovon 200.300 MWh auf Rechenzentren fallen) und eine Gesamtzahl von 22.300.000.000 Transaktionen aus.

35 Der GRI-Bericht von PayPal (PayPal, 2022) weist für das Jahr 2022 517.100 t CO<sub>2</sub> eq./a (Scope 1 bis 3) und eine Gesamtzahl von 22.300.000.000 Transaktionen aus.

wird (CCAF, 2023). Pro Transaktion entspricht dies ca. 1 g Sb eq., 486 kg CO<sub>2</sub> eq. und 10.192 MJ. Die 486 kg CO<sub>2</sub> eq. entsprechen EUR 115,18 gemäss der UBA-Methodenkonvention (Umweltbundesamt 2024). Diese Ergebnisse sind im Einklang mit bestehenden Berechnungen: Für die Nutzungsphase weichen die Resultate hinsichtlich GWP und KSA (kWh/a) ca. 6% von CCAF ab. Grund hierfür ist ein leicht unterschiedlicher Mix der Mining-Hardware.

Diese Ergebnisse werden in den Kontext der Umweltauswirkungen einer nicht-DLT-basierten Anwendung gestellt. Wie in Abschnitt 3.2.1 diskutiert, wird PayPal als alternativer digitaler Zahlungsdienstleister betrachtet. Hierzu ziehen wir den von PayPal erstellten und durch Bureau Veritas UK Ltd verifizierten GRI -Bericht zur Hilfe (PayPal, 2022). Die letzte Zeile in Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse für PayPal pro Transaktion. Gemäss PayPal stammen 90% der Energie aus erneuerbaren Quellen. Unter dieser Annahme und wenn alle vorgelagerten Prozesse korrekt berücksichtigt sind, verursacht eine PayPal-Transaktion ca. 23 g CO<sub>2</sub> eq. Emissionen und benötigt ca. 0,01 kWh Strom.

Pro getätigte Transaktion berechnen wir somit eine über 20.000-fach höhere Umweltwirkung gemessen an GWP und eine ungefähr 80.000-fach höhere Umweltwirkung gemessen an KSA für Bitcoin im Vergleich zu PayPal. Diese enorm hohe Differenz entsteht durch die Rechenintensität des Bitcoin-Minings. Die Hashrate im Netzwerk steht in einem extremen Verhältnis zur Anzahl Transaktionen im Netzwerk. Es wird schlicht sehr viel Energie benötigt, um diese Hashrate realisieren zu können.

Ein häufig genanntes Problem ist zudem der durch Bitcoin verursachte Elektroschrott. Auf der Grundlage der von uns im Rahmen dieser Studie gesammelten Daten kann geschätzt werden, dass es ungefähr 43 Tausend Tonnen Elektroschrott<sup>36</sup> pro Jahr entsteht, die mit Bitcoin in Verbindung gebracht werden kann.

Diese Menge errechnet sich wie folgt:

$$\text{Elektroschrott} = \phi G_{BTC} \times \left( \frac{N_{BTC}}{\phi B_{BTC}} \right) + (1 - pE)$$

Wobei,

- a)  $\phi G_{BTC}$ : Gewicht einer durchschnittlichen Mining-Hardware
- b)  $N_{BTC}$ : Anzahl Mining-Hardware im Betrieb pro Jahr
- c)  $\phi B_{BTC}$ : Betriebsdauer einer durchschnittlichen Mining-Hardware
- d)  $pE$ : Prozent-Anteil der wiederverwendeten oder recycelten Mining-Hardware

<sup>36</sup> Auf der Grundlage der für diese Studie gesammelten Daten werden folgende Annahmen getroffen: Das durchschnittliche Gewicht einer Mining-Hardware beträgt 16,3 kg, es wird geschätzt, dass mehr als 2,2 Mio. Hardware pro Jahr nicht mehr verwendet werden und dass 17,4 % davon recycelt werden (basierend auf de Vries 2019).

### 3.1.3 Diskussion und Fazit

Aus den Berechnungen und können folgende Schlüsse gezogen werden:

- ▶ Die Bitcoin-Blockchain mit ihrem POW-Konsensmechanismus ist ein alternatives, einfaches und widerstandsfähiges dezentrales Netzwerk für den Werttransfer. Allerdings verursacht sie aufgrund des hohen Energieverbrauchs und der großen Menge an Elektroschrott eine erhebliche Umweltbelastung.
- ▶ Bitcoin wird trotz Alternativen aufgrund der hohen Dezentralität und der hohen Sicherheit voraussichtlich nicht an Popularität verlieren (SWOT-Analyse, vgl. Anhang A.5).
- ▶ Die Umweltwirkung in Bezug auf Energieaufwand und Treibhausgaspotenzial hängt primär vom Stromverbrauch ab. Daher ist die Herstellungsphase bei POW-Blockchains zumindest aktuell im Vergleich zur Nutzungsphase und End-of-Life-Phase weniger relevant.
- ▶ Die Resultate in Bezug auf Energieaufwand und Treibhausgaspotenzial werden zudem vor allem vom länderspezifischen Strommix getrieben. Die Miner suchen nach Lösungen, um kostengünstige Energieträger zu verwenden, da dies ihre Kosten senkt. Solange nicht ein großer Teil des Strommixes aus alternativen Quellen stammt oder als „Abfallprodukt“ genutzt wird, bleiben die Umweltwirkungen jedoch sehr hoch.
- ▶ Der Rohstoffverbrauch und hierbei vor allem das Aufkommen von Elektroschrott ist beträchtlich.
- ▶ Im Vergleich sind die direkten Umweltauswirkungen deutlich höher als bei alternativen Lösungen (bspw. PayPal).

## 3.2 Ethereum und andere POS-Blockchains

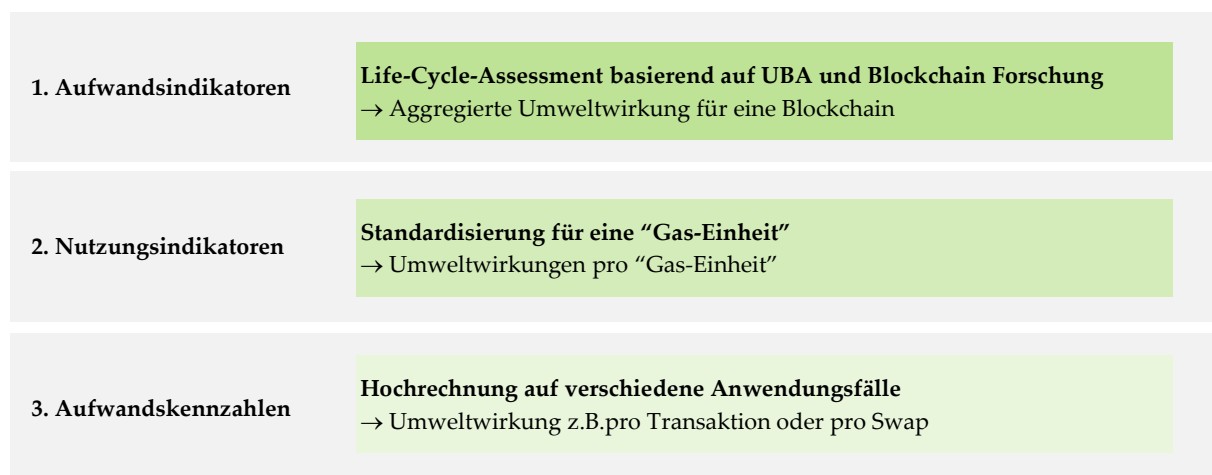
Im Folgenden werden die Umweltauswirkungen von Ethereum bewertet. In Abschnitt 3.2.1 wird die Methodik der quantitativen Analyse erläutert und in Abschnitt 3.2.2 werden die quantitativen Ergebnisse dokumentiert. Die Ergebnisse der qualitativen Analyse werden in Anhang A.5 diskutiert.

### 3.2.1 Methodik

Wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, wird in diesem Bericht **Ethereums Rolle als Plattform für DLT-basierte Anwendungen** analysiert. Das nicht-DLT-basierte Pendant dazu sind Cloud-Dienstleistungen, die ebenso als Plattform für Anwendungen dienen und die als Vergleich betrachtet werden. Daher wird in der Analyse von Ethereum zunächst auf die Umweltauswirkungen pro standardisierte Einheit „Gas“ ein Fokus gelegt.<sup>37</sup> Das ermöglicht, die Umweltauswirkungen einzelner Rechenoperationen zu bestimmen, damit ein Vergleich mit der Alternative gezogen werden kann.

Konkret wird ein Life-Cycle-Assessment mit den KPI4DCE- und GCC-Werkzeugen, und dem Vorgehen in CCRI (2022) kombiniert. Abbildung 9 zeigt das schematische Vorgehen. Wir ermitteln zunächst die aggregierten Umweltauswirkungen des Ethereum-Netzwerks. In einem zweiten Schritt werden diese Auswirkungen pro Einheit „Gas“ heruntergebrochen. In einem letzten Schritt nutzen wir dann die somit standardisierten Auswirkungen pro Einheit „Gas“, um die Umweltwirkungen einzelner, konkreter Anwendungen wie beispielsweise die Durchführung einer einzelnen Transaktion im Netzwerk zu ermitteln, welche einer konkreten Anzahl Einheiten „Gas“ entspricht.

**Abbildung 9: Dreistufiges Vorgehen der Bestimmung des Umweltaufwandes von Ethereum**



Quelle: Eigene Darstellung.

<sup>37</sup> Gas bezeichnet auf der Blockchain Ethereum eine Recheneinheit, welche den Rechenaufwand der Ausführung bestimmter Operationen misst. Auf Basis von Gas müssen Rechenleistungen bezahlt werden. Die Gasgebühren dienen dazu, die Validatoren für die von ihnen geleistete Arbeit zu kompensieren und gleichzeitig das Netzwerk durch die Erhöhung der Kosten für potenziell schädliche oder Spamtransaktionen zu schützen. Die Gasgebühren setzen sich aus zwei Komponenten zusammen: der Grundgebühr und der Prioritätsgebühr. Die Grundgebühr orientiert sich an der aktuellen Netzwerkauslastung und spiegelt somit die Nachfrage nach Rechenleistung wider. Die Prioritätsgebühr, ermöglicht es den Nutzern, einen Anreiz für eine schnellere Abwicklung ihrer Transaktionen zu setzen. Bei der Durchführung einer Transaktion wird der Verbrauch an Gas gemessen und mit dem aktuellen Gaspreis multipliziert, um die Gesamtgebühr zu berechnen, die der Nutzer zahlen muss (Ethereum.org 2023b).

**In der Analyse wird ein Fokus auf „Gas“** gelegt, da dieses eine standardisierte Kennzahl für die nötige Rechenleistung im Ethereum-Netzwerk ist. Jede durchgeführte Operation, sei es eine Transaktion oder die Ausführung eines Smart Contracts, erfordert einen gewissen Umfang an Rechenkapazität. Die benötigte Rechenleistung für diese Operationen wird dabei in der Einheit „Gas“ gemessen. Die Menge an verbrauchtem „Gas“ korreliert direkt mit der Komplexität der jeweiligen Berechnung; je anspruchsvoller die Operation, desto höher ist der Gasverbrauch. „Gas“ fungiert somit als standardisierte Messgröße für die Bewertung der Ressourcennutzung auf der Ethereum-Plattform.

Für die Bestimmung der Umweltauswirkungen des Ethereum-Netzwerks wird zwischen der Herstellungsphase und der Nutzungsphase getrennt. Für die Herstellungsphase werden zunächst die minimalen Hardware-Anforderungen ermittelt, um einen Node im Netzwerk zu betreiben.<sup>38</sup> Diese Anforderungen unterscheiden sich allerdings je nachdem welche Software-Clients genutzt werden. Konkret braucht es für einen Node im Ethereum-Netzwerk einen Konsensus-Client und einen Ausführungs-Client. Ersterer implementiert den POS-Konsensmechanismus. Zweiterer sammelt die im Netzwerk kommunizierten neuen Transaktionen, führt diese aus und speichert den aktuellen Stand und die Datenbank aller aktuellen Ethereum-Daten.<sup>39</sup> Ethereum verfügt über verschiedene interoperable Clients, die von unabhängigen Teams in unterschiedlichen Programmiersprachen entwickelt und gepflegt werden und welche unterschiedliche Ressourcenmengen in Anspruch nehmen. Es existieren jedoch gute Quellen, welche die Verteilung der unterschiedlichen Clients untersuchen und publizieren (clientdiversity.org 2023). Auf dieser Basis wird die durchschnittliche, minimal erforderliche Hardware von Ethereum-Nodes berechnet. Für die Nutzungsphase nutzen wir ebenfalls die durchschnittlichen Clients auf Ethereum und verbinden dies mit den in CCRI (2022) gemessenen Stromverbräuchen. Das ermöglicht den Stromverbrauch des durchschnittlichen Ethereum-Nodes zu bestimmen.<sup>40</sup> Die Berechnung der beiden Phasen ist in Abbildung 10 dargestellt und sind im Detail in Anhängen A.1.2 bzw. A.1.3 beschrieben.

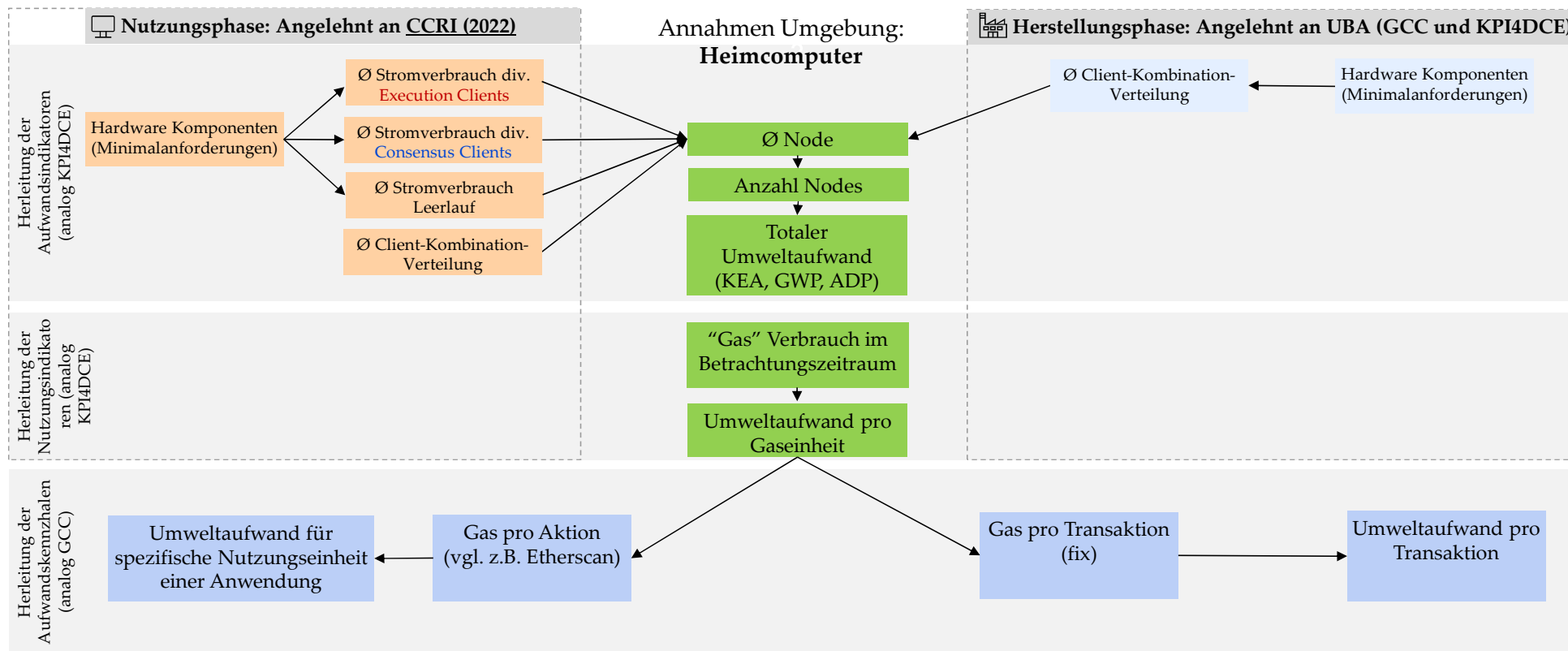
---

38 Als Node wird eine laufende Instanz der Ethereum-Client-Software bezeichnet.

39 Es existieren zudem noch Validator-Clients für die Nodes, die Transaktionen im Netzwerk validieren (Validatoren). Da im Ethereum-Netzwerk zu jedem Zeitpunkt stets nur ein Validator ausgewählt wird, um die Transaktionen zu validieren, vernachlässigen wir diesen zusätzlichen Verbrauch, da er gemessen am Gesamtnetzwerk vernachlässigbar klein ist.

40 Um vom Stromverbrauch auf die Umweltauswirkungen zu schließen, nehmen wir zunächst an, dass alle Nodes den gleichen Strommix nutzen, sprich den gleichen Emissionsfaktor haben. Diese Annahme verfeinern wir sukzessive im Laufe der Analyse.

Abbildung 10: Detaillierte Schritte in der Bestimmung des Umweltaufwandes von Ethereum



Quelle: Eigene Darstellung.

Die kombinierten Umweltauswirkungen dieses durchschnittlichen Ethereum-Nodes aus der Herstellungs-, sowie Nutzungsphase multipliziert mit der Gesamtzahl von Nodes im Ethereum-Netzwerk ergibt schließlich den totalen Umweltaufwand des Gesamtnetzwerks. Auf Basis des (öffentlich einsehbaren) Gasverbrauchs im Betrachtungszeitraum können sodann die Umweltauswirkungen pro Einheit „Gas“ bestimmt werden. Abbildung 10 zeigt dieses Vorgehen schrittweise für Herstellungs- und Nutzungsphase und die Bestimmung pro Einheit „Gas“.

Da die „Gas“-Gebühren pro Transaktion im Ethereum-Netzwerk konstant auf 21.000 Einheiten „Gas“ festgelegt sind, können somit final die Umweltauswirkungen pro Transaktion bestimmt werden (Wood 2024).

Wie zuvor beschrieben, wird Ethereum in dieser Analyse als Plattform für DLT-Anwendungen betrachtet. Um die Umweltauswirkungen von Ethereum einordnen zu können, vergleichen wir diese mit einer nicht-DLT-basierten Lösung, die ebenfalls als Plattform für Software-Dienstleistungen angesehen werden kann: Cloud Computing. Hierbei wird der Fokus explizit ausschließlich auf Cloud Computing Ressourcen gelegt und die Cloud Storage Lösungen werden außen vorgelassen, da Blockchains nicht zur Speicherung großer Datenmengen genutzt werden können. Wir vergleichen hierbei die Kapazität einer Node in der Cloud mit Ethereum.

Kern der Ethereum-Plattform ist die **Ethereum Virtual Machine (EVM)**, welche als Laufzeitumgebung für die Ausführung von Smart Contracts und dezentralen Anwendungen (DApps) dient. Die EVM ist für die Verarbeitung und Ausführung von Code zuständig, der in der nativen Programmiersprache von Ethereum, Solidity, oder anderen kompatiblen Sprachen geschrieben wurde. Eine Kopie der EVM läuft auf jedem Node im Ethereum-Netzwerk. Wenn Transaktionen im Netzwerk kommuniziert werden, führt jeder Node diese Transaktion auf ihrer EVM aus und überprüft ob die kommunizierten Änderungen den berechneten Änderungen entsprechen.<sup>41</sup> Dieses dezentrale Ausführen und Überprüfen der Berechnungen ist zwar entscheidend für den Konsensmechanismus und die Funktionsweise von Ethereum als dezentrale Plattform, aber gleichzeitig – per Definition einer dezentralen Berechnung – redundant: Wenn dem Node, der die Transaktionen ins Netzwerk kommuniziert, vertraut werden könnte, wäre eine einzelne Ausführung der Berechnungen ausreichend. Bei Ethereum werden die Berechnungen aber redundant, also von jedem Node durchgeführt. Rechnerisch ist der passende Vergleich somit eine Cloud Computing Umgebung, die als vollständiger Node im Ethereum-Netzwerk fungieren könnte und somit alle Berechnungen durchführen kann.

Für die Bestimmung der notwendigen Hardware wird auf den berechneten, durchschnittlichen Node im Ethereum-Netzwerk zurückgegriffen. Diese muss ebenfalls alle Transaktionen in jedem Block ausführen können. Der Vergleich der Umweltauswirkungen zwischen der Ethereum-Plattform und einer äquivalenten Cloud Computing Lösung ist somit eine Funktion der Größe des Netzwerks. Denn je mehr Nodes, desto häufiger muss die gleiche Berechnung durchgeführt werden.

Der Vergleich stellt hierbei eine Annäherung dar, damit eine Einschätzung der Größenordnungen vorgenommen werden kann.

---

<sup>41</sup> Transaktionen sind letztlich Veränderungen in den gespeicherten Zuständen (States) auf der Blockchain. Um mit der EVM zu interagieren, senden Nutzer oder DApps Transaktionen an Ethereum-Adressen, die ausführbaren Code enthalten. Diese Transaktionen veranlassen die EVM, den Code auszuführen und aus dem Ethereum-Zustand (der Blockchain) zu lesen bzw. in diesen zu schreiben.

### 3.2.2 Ergebnisse

Tabelle 11 dokumentiert die Ergebnisse der quantitativen Bewertung von Proof-of-Stake-Blockchains im konkreten Fall von Ethereum. Die Ergebnisse sind etwa doppelt so hoch wie die Schätzungen aus früheren Berechnungen. Dies ist auf die Herstellungsphase zurückzuführen, die in den anderen Schätzungen nicht berücksichtigt wurde.<sup>42</sup> Im Vergleich zu POW fallen die Resultate aber trotzdem deutlich geringer aus. Dies weil bei einem POS-Konsensmechanismus deutlich weniger Energieaufwand benötigt wird als bei einem POW-Mechanismus. Ethereum weist pro Transaktion nur 0,015% (gemessen nach ADP) bzw. 0,0005% (gemessen nach GWP und KEA) der Umweltauswirkungen von Bitcoin auf.<sup>43</sup>

**Tabelle 11: Ergebnisse der quantitativen Bewertung von POS-Blockchains und Ethereum**

	ADP (kg Sb eq./a)	KSA (kWh/a)	KEA (MJ/a) <sup>44</sup>	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq./a)
Herstellungsphase	294	NA	28.802.602	2.145.835
Nutzungsphase	0	7.026.245	75.180.824	2.561.511
<b>Total<sup>45</sup></b>	<b>294</b>	<b>7.026.245</b>	<b>103.983.425</b>	<b>4.707.346</b>
<b>Pro Transaktion</b>	<b>0,0000002</b>	<b>0,004</b>	<b>0,06</b>	<b>0,003</b>
<b>Pro Transaktion (Single Node)</b>	<b>1,2·10<sup>-11</sup></b>	<b>2,9·10<sup>-7</sup></b>	<b>4,4·10<sup>-6</sup></b>	<b>2,0·10<sup>-7</sup></b>

Quelle: Eigene Berechnung.

Wie zu erwarten, zeigt sich aber eine deutlich höhere direkte Umweltwirkung von Ethereum im Vergleich zu einer hypothetischen Ethereum-Blockchain mit einem einzigen Node. Wie in Abschnitt 3.2.1 diskutiert, ist jeder Ethereum-Node in der Lage, die Transaktionen durchzuführen und in der Blockchain abzuspeichern und somit (aus rechnerischer Sicht) die volle Funktionalität abzubilden. Entsprechend der Größe des Ethereum-Netzwerks werden daher ca. 13.000-fach höhere Umweltauswirkungen von Ethereum im Vergleich zu einer Single Node festgestellt, was daran liegt, dass zum Zeitpunkt der Datenerhebung (1.1.2024) ca. 13.000 Full-Nodes aktiv waren.

In dieser Berechnung sind jedoch lediglich die direkten Effekte berücksichtigt. Viele Anwendungen benötigen zusätzlich zur rechnerischen Leistung Sicherheiten und Vertrauen, damit Nutzer bereit sind, sich auf die gespeicherten Daten oder durchgeführten Berechnungen zu verlassen und die Anwendung zu nutzen. Eine zentrale Instanz (oder Single Node) kann beispielsweise anfälliger für unbefugte Änderungen sein. Diese indirekten Effekte sind in den Berechnungen für die alternative Lösung in Tabelle 11 nicht berücksichtigt. Für einen Vergleich

42 Die Ergebnisse der Nutzungsphase können mit den Ergebnissen des Cambridge Center for Alternative Finance (CCAF) verglichen werden. Das CCAF schätzt, dass das Bitcoin-Netzwerk am 1.1.2024 6,85 GWh Strom (24.660.000 MJ) verbraucht und 2,49 kt CO<sub>2</sub>-Äquivalent (2.490.000 kg CO<sub>2</sub> eq.) emittiert. Wir erhalten ähnliche, aber leicht höhere Ergebnisse sowohl für GWP als auch für KEA. Dieser Vergleich bestätigt jedoch, dass unsere Ergebnisse in einer vernünftigen Größenordnung liegen. Die Ergebnisse der Herstellungsphase wurden überprüft, indem wir unsere Berechnungen im GCC-KPI4DC Tool replizierten. Wir erhalten die gleichen Ergebnisse.

43 Diese Ergebnisse werden berechnet, indem die in Tabelle 6 dargestellten Ergebnisse (z. B. ADP pro Transaktion) durch die entsprechenden in Tabelle 5 dargestellten Ergebnisse (z. B. ADP pro Transaktion) dividiert werden.

44 Die Werte für KEA werden auf der Grundlage des Primärenergiefaktors für Deutschland berechnet. Es wird der in der Green Cloud Computing Studie des UBA verfügbare Faktor verwendet: 10,7 MJ/kWh.

45 Im Jahr 2023 hat das Ethereum-Netzwerk etwa 39 Billionen Gas-Einheiten verarbeitet (Glassnode 2024). Jede Transaktion im Ethereum-Netzwerk benötigt 21.000 Gas-Einheiten. Daraus ergibt sich, dass das Netzwerk ein Äquivalent von rund 1,9 Milliarden Transaktionen abgewickelt hat. Entsprechend werden für die Ermittlung der Werte pro Transaktion die berechneten totalen Werte durch ca. 1,9 Milliarden geteilt.

mit einer solchen Plattform kann wiederum auf PayPal als Beispiel zurückgegriffen werden. Im Vergleich zu PayPal stößt eine Transaktion auf Ethereum nur ca. 10% der Treibhausgasemissionen (GWP) aus und benötigt nur ca. 30% des Stroms (KSA). Der Unterschied zeigt sich insb. in den Scope 3 Emissionen, die bei Ethereum weitgehend „nur“ auf die Rechenkapazitäten entfallen. Gegenüber PayPal ist Ethereum somit als Zahlungsnetzwerk effizienter, da das Blockchain-Netzwerk im Vergleich zu PayPal keine zentrale Verwaltung und Koordination benötigt.

Insgesamt lässt sich schließen, dass Ethereum für Anwendungen, die wenig oder keine Sicherheit und Koordination erfordern, ungeeignet ist und im Vergleich zu den Alternativen hinsichtlich der Umweltauswirkungen schlecht abschneidet. Für Anwendungen mit hohem Koordinations- und Vertrauensbedarf, wie z.B. ein Zahlungsnetzwerk, ist Ethereum hingegen vorteilhaft und kann im Vergleich zu anderen Lösungen Umweltressourcen schonen.

### 3.2.3 Diskussion und Fazit

Aus den Berechnungen und können folgende Schlüsse gezogen werden:

- ▶ Ethereum mit seinem POS-Konsensmechanismus ist ein dezentrales Zahlungs-/Werteübermittlungssystem, das zusätzlich die Ausführung von automatisierten Verträgen (Smart Contracts) ermöglicht. Es gibt zahlreiche Anwendungsfälle, bei denen POS im Zusammenhang mit dem Transfer und der Speicherung von Werten denkbar ist.
- ▶ POS kann insb. die Verwahrung und die Transaktionsabwicklungsfunktion von Banken ersetzen bzw. vereinfachen. (vgl. auch SWOT-Analyse, Anhang A.5). Darüber hinaus ermöglicht es manipulations sichere Börsen und andere Anwendungen.
- ▶ POS hat deutlich geringere Umweltwirkungen als POW, weil Einlagen statt Energie als Sicherheit eingesetzt werden. Im Vergleich zu Rechenzentren ist der (direkte) Energieaufwand trotzdem sehr hoch, da redundant berechnet wird.
- ▶ Die CO<sub>2</sub> eq. Emissionen verteilen sich in etwa gleich auf die Herstellungs- und die Nutzungsphase. Im Vergleich zu Bitcoin-Miner sind Ethereum-Validatoren weniger bedacht effiziente Software/Hardware einzusetzen, da diese nicht die Wahrscheinlichkeit erhöht, belohnt zu werden.
- ▶ Im Vergleich sind die direkten Umweltauswirkungen geringer als bei den alternativen Lösungen wie PayPal. Vor dem Hintergrund, dass PayPal keine Wertaufbewahrungsfunktion übernimmt, und POS erhebliches Effizienz-Potenzial (Upgrades, Aggregation von Transaktionen) aufweist, ist POS im Bereich der Wertaufbewahrung und Wertübertragung im ökologischen Sinne als positive Entwicklung anzusehen, sofern es klassische Intermediäre (teilweise) ersetzen kann.

## 3.3 Lokale Energiemärkte

### 3.3.1 Methodik

Es existieren unterschiedlichste Energie-Pilotprojekte und Energiegemeinschaften europaweit. Um die Umweltauswirkungen von lokalen Energiemärkten einschätzen zu können, benötigt es daher Annahmen zu zwei zentralen Aspekten: (i) die genutzte Hardware und (ii) die Blockchain, auf der ein Energiemarkt implementiert wird. Im Folgenden wird **eine Methodik entwickelt, die sich auf ein spezifisches Pilotprojekt konzentriert**, dessen technische Details in ausreichendem Maße bekannt sind, um die Umweltauswirkungen schätzen zu können. Bei entsprechender Informationslage kann eine analoge Methodik auch für andere beispielhafte Implementierungen lokaler Energiemärkte angewendet werden.

Im Fokus steht zunächst das **Pilotprojekt „Quartierstrom“** (Quartierstrom 2023). Es besteht aus 37 Haushalten, die mit Smart Metern ausgestattet sind. Jeder dieser Smart Meter verfügt zusätzlich über einen Raspberry Pi. Der Raspberry Pi ist ein kostengünstiger, kreditkartengroßer Computer, der von der Raspberry Pi Foundation entwickelt wurde. Er läuft auf Open-Source-Software und bietet vielseitige Einsatzmöglichkeiten, von DIY-Projekten und Bildungszwecken bis hin zu Steuerungsaufgaben in der Elektronik. Auf diesen Raspberry Pi wird die anwendungsspezifische, private Blockchain betrieben, deren Nutzer ihren Zugang von einem zentralen Verwalter des Blockchains erhalten. Genutzt wird hierbei das **Tendermint Protokoll**.

Das Tendermint Protokoll besteht aus zwei zentralen Bausteinen: einer Blockchain-Konsens-Engine und einer generischen Anwendungsschnittstelle. Erstere wird auch als Tendermint Core bezeichnet und garantiert, dass Transaktionen auf jedem Rechner im Netzwerk in der gleichen Reihenfolge aufgezeichnet werden. Dazu wird ein Proof-of-Stake-Konsensmechanismus genutzt. Zweitere – das Application Blockchain Interface, ABCI – erlaubt es, Transaktionen in jeder Programmiersprache zu verarbeiten. ABCI ist somit ein Werkzeug für Blockchains (oder Blockchain-Anwendungen), um sich mit dem Tendermint Core zu verbinden.

Damit ein neuer Block hinzugefügt wird, müssen zwei Drittel der Validatoren zustimmen. Anders als Ethereum, kann das Tendermint-Protokoll daher nur weiterlaufen, wenn mindestens zwei Drittel der Validatoren online und verfügbar sind.<sup>46</sup> Der hierfür verwendete Konsensmechanismus wird als „Practical Byzantine Fault Tolerant“ (PBFT) bezeichnet. Ein wichtiger Nachteil von derartigen Protokollen ist, dass mehr Nachrichten zwischen den Validatoren ausgetauscht werden müssen, bevor es zu einem Konsens kommen kann.<sup>47</sup> Dies limitiert die Skalierbarkeit des Protokolls.

Die verwendeten Raspberry Pis im Quartierstrom-Projekt entsprechen dem Raspberry Pi 3 Model B, welches mit einer Quad-Core ARMv8 CPU mit 1,2 GHz und 1 GB RAM ausgestattet ist. Zudem ist jeder dieser Raspberry Pis mit einem SmartPi Hardware Attached on Top (HAT) versehen, der die Messung von Spannung und Stromfluss ermöglicht.

Laut Meeuw et al. (2020) erreicht die Implementierung des Energiemarktes eine maximale Transaktionsrate von 10,5 Transaktionen pro Sekunde (tps). Dieses Maximum wird aber durch die Rechenkapazität des Raspberry Pi begrenzt, nicht durch die Übertragungskapazität des Netzwerks. Somit kann ein Bezug zwischen der Anzahl Transaktionen pro Sekunde und dem

<sup>46</sup> Jede Blockchain muss eine Abwägung zwischen Verfügbarkeit der Blockchain und Sicherheit (oder Konsistenz) der Blockchain treffen. Bitcoin und Ethereum haben die ständige Verfügbarkeit höher bewertet als Tendermint, daher kann es aber beispielsweise auf Bitcoin zu Forks kommen.

<sup>47</sup> Approximativ benötigt es 3 Nachrichten pro Validator im P2P-Austausch. Im Ablauf des Tendermint-Protokolls beispielsweise gibt es zunächst eine Vorschlagsphase, dann eine Vorabstimmungsphase („Pre-Vote“) und schlussendlich eine Vorfestlegungsphase („Pre-Commit“). Erst wenn in der zweiten und dritten Phase jeweils zwei Drittel der Validatoren zustimmen, wird ein Block angenommen.

Stromverbrauch unter Volllast hergestellt werden. Ein Raspberry Pi 3 Model B verbraucht etwa 3,6 Watt unter Volllast (Eco Energy Geek 2022). Somit können ca. 10 Transaktionen pro Sekunde verarbeitet werden bei einem Stromverbrauch von 3,6 Watt.

Unter der vereinfachenden Annahme, dass der Stromverbrauch eine lineare Funktion der Anzahl Transaktionen ist, ergibt sich ein Verbrauchswert pro zusätzliche Transaktion, der zwischen den in der Studie CCRI (2023) geschätzten Werten für andere Blockchain-Anwendungen liegt; niedriger als bei Polkadot und Avalanche-DFK, jedoch höher als bei Ethereum, Solana, Cosmos und Algorand. Dies entspricht der erwarteten Größenordnung aufgrund der zuvor erwähnten Probleme der Skalierbarkeit des Tendermint Protokolls.

Um final die Umweltauswirkungen der Nutzungsphase zu bestimmen, kann dieser Energieaufwand sodann mit einem Emissionsfaktor multipliziert werden, wie in CCRI (2022) beschrieben. Dadurch kann eine Abschätzung der CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen erfolgen, die durch die Durchführung von Transaktionen auf dieser Blockchain-basierten Plattform entstehen.

Diese Methodik ist, wie zuvor erwähnt, auf ein spezifisches Pilotprojekt mit einer konkreten Blockchain konzentriert. Diese kann ebenso auf andere Pilotprojekte angewendet werden, wenn entsprechende Informationen zur Anzahl Transaktionen und verwendeter Hardware und Blockchain vorliegen. Das „Quartierstrom“ Projekt ist recht einzigartig in der Breite der wissenschaftlichen Publikationen und entsprechend öffentlich verfügbaren Informationen. Eine Möglichkeit ist, eine Implementierung auf einer privaten Ethereum-Blockchain zu analysieren. Da eine Methodik der Schätzung der Umweltauswirkungen einzelner Ethereum-Nodes in Abschnitt 3.2.1 bereits entwickelt wurde, ist eine Anwendung auf eine private Ethereum-Blockchain prinzipiell möglich. Somit kann eine Bandbreite an Schätzungen für private, POS Blockchains angegeben werden.

### 3.3.2 Ergebnisse

Tabelle 12 dokumentiert die Ergebnisse der quantitativen Bewertung von lokaler Energiemärkte im Fallbeispiel „Quartierstrom“. Da das Netzwerk in diesem Fall aus nur 37 Nodes besteht, fallen die Umweltauswirkungen gemessen nach ADP vergleichsweise gering aus – ähnlich wie bei dem „Single Node“ Vergleich für POS-Blockchains zuvor. Da sämtliche Nodes des Netzwerks zudem in der Schweiz installiert sind und die Schweiz einen relativ geringen Emissionsfaktor pro kWh aufweist, fallen die Umweltwirkungen insgesamt relativ gering aus.

**Tabelle 12: Ergebnisse der quantitativen Bewertung von lokalen Energiemärkten**

	ADP (kg Sb eq./a)	KSA (kWh/a)	KEA (MJ/a) <sup>48</sup>	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq./a)
Herstellungsphase	0,77	N/A	50.470	3.486
Nutzungsphase	0,00	1.168	12.494	64
<b>Total</b>	<b>0,77</b>	<b>1.168</b>	<b>62.964</b>	<b>3.550</b>
Pro Transaktion	0,0000000023	0,0000035	0,00019	0,000011
<b>Pro Transaktion</b> (Produktion Deutschland)	<b>0,0000000023</b>	<b>0,0000035</b>	<b>0,00019</b>	<b>0,000012</b>

Quelle: Eigene Berechnung.

<sup>48</sup> Die Werte für KEA werden auf der Grundlage des Primärenergiefaktors für Deutschland berechnet. Es wird der in der Green Cloud Computing Studie des UBA verfügbare Faktor verwendet: 10,7 MJ/kWh.

Gemessen nach ADP werden nur 0,3% der Umweltauswirkungen dieser privaten Tendermint Blockchain im Vergleich zu Ethereum berechnet. Grund dafür ist die einfache Raspberry Pi Hardware, auf der dieser Energiemarkt läuft und die deutlich weniger Ressourcen benötigt in der Fertigung. Gemessen an GWP und KEA werden sogar noch deutlich geringere Auswirkungen im Vergleich zu Ethereum von uns festgestellt. Hier ist der entscheidende Faktor die Größe des Netzwerks: Die 37 Nodes des Energiemarktes stehen hier im Vergleich zu ungefähr 13.000 Ethereum Nodes. Da jeder Node die unterschiedlichen Transaktionen jeweils berechnen und überprüfen muss, entstehen deutlich größere Umweltauswirkungen bei Ethereum. Der Vergleich zur „Single Node“ von Ethereum zeigt entsprechend, dass der Energiemarkt mit der Tendermint Blockchain mehr Ressourcen verbraucht (mit 37 Nodes allerdings) und nicht pauschal eine bessere Lösung darstellt in Bezug auf den Ressourcenverbrauch.

Da das Pilotprojekt „Quartierstrom“ in der Schweiz umgesetzt wurde, wurden diese Berechnungen unter der Annahme durchgeführt, dass das gesamte Netzwerk in der Schweiz installiert ist. In der letzten Zeile werden daher zusätzlich die Umweltauswirkungen ausgewiesen, wenn das gesamte Netzwerk stattdessen in Deutschland implementiert wäre. Die benötigte Hardware und der Stromverbrauch ändern sich hierbei natürlich nicht, sodass die Umweltauswirkungen nach ADP oder KEA-Indikatoren unbeeinflusst bleiben. Aber der Emissionsfaktor der Stromproduktion unterscheidet sich deutlich zwischen der Schweiz und Deutschland, sodass das GWP höher ausfällt. Wie die letzte Zeile ausweist, sind die Auswirkungen pro Transaktion nach GWP-Indikator ca. 10% höher.

### 3.3.3 Diskussion und Fazit

Aus den Berechnungen und können folgende Schlüsse gezogen werden:

Ergebnisse von „Quartierstrom“: Lösung schneidet schlechter ab als eine alternative zentrale Anwendung. Die Umweltwirkungen fallen aufgrund der Netzwerkgröße (37 Nodes) und des Standorts (Schweiz) mit niedrigem Emissionsfaktor pro kWh jedoch nur geringfügig aus.

- ▶ Deutlich geringere Umweltwirkungen im Vergleich zu einer Anwendung, die auf einer öffentlichen Blockchain läuft, sowohl in ADP als auch in GWP und KEA. Gründe: Einfachere Hardware (Raspberry Pi), geringere Netzwerkgröße.
- ▶ Einfluss des Standorts: Berechnungen basieren auf der Annahme, dass das Netzwerk vollständig in der Schweiz installiert ist. Bei Verlegung nach Deutschland würde das GWP aufgrund des höheren Emissionsfaktors der Stromproduktion um ca. 25% steigen.
- ▶ Obwohl „Quartierstrom“ mit seiner Tendermint Blockchain und 37 Nodes einen größeren Ressourcenverbrauch als eine „Single Node“ von Ethereum aufweist, bietet es in der spezifischen Konstellation (kleines Netzwerk in der Schweiz) eine umweltfreundlichere Alternative. Der Vergleich unterstreicht die Bedeutung der Netzwerkgröße und des -standortes für die Umweltbilanz.

## 3.4 Green Bonds

### 3.4.1 Methodik

Die Blockchain eröffnet neue Möglichkeiten, insbesondere hinsichtlich Vertrauensbildung und Effizienz, indem sie Transaktionen sicher und nachvollziehbar macht. Konkret kann die Blockchain die Transparenz in der Lieferkette verbessern, den Handel von Umweltgütern durch Tokenisierung ermöglichen und den Zugang und den Handel von grünen Investitionen vereinfachen (Zhao 2022). Wie Giri et al. (2024) zeigen, kann die Erhöhung der Transparenz und des Vertrauens, zu grössere Investitionsbereitschaft in Green Bonds führen.

Vorliegend wird ein Fokus auf die erleichterte Investition durch Tokenisierung und Handel von grünen Anleihen („digital“ Green Bonds) gesetzt. Anbieter solcher Anleihen sind beispielsweise SG-FORGE und GreenRock Energy (siehe auch Abschnitt 2.2.4).

Der Lebenszyklus eines Green Bonds beinhaltet grundsätzlich verschiedene Schritte wie die Emission der Anleihe, den Handel sowie die Zahlungsabwicklung allfälliger Zinszahlung, sowie die Rückzahlung des Nennwerts der Anleihe. Vorliegend konzentrieren wir uns auf den Handelsaspekt, da er als der vorherrschende Prozessschritt identifiziert wurde.

Als zentralen Ausgangspunkt unserer Überlegungen wird das etablierte Uniswap Protokoll gewählt.<sup>49</sup> Dieses fällt unter die Kategorie „Decentralized Exchange“ oder DEX und wurde bereits im Jahr 2018 ins Leben gerufen. Es ermöglicht den Handel mit Tokens bzw. tokenisierten Vermögenswerten unabhängig vom spezifischen Anwendungsfall. Uniswap erleichtert insbesondere den Handel mit Vermögenswerten, die auf traditionellen Börsen aufgrund ihrer geringen Liquidität nicht gelistet sind.

Die Wahl von Uniswap als Grundlage ermöglicht es uns, eine breite Palette an Handelsaktivitäten abzudecken, die auf einer ähnlichen Plattform durchgeführt werden könnten. Dies bietet eine solide Basis, um die Auswirkungen und die Herausforderungen des Handels mit tokenisierten Vermögenswerten zu verstehen und zu analysieren.

Uniswap ist eine dezentrale Anwendung, die unter anderem auf der Ethereum-Blockchain mittels Smart Contracts betrieben wird. Entsprechend wird auf die in Kapitel 3.2 beschriebene Methodik zurückgegriffen:

1. Berechnung der Umweltwirkung pro Gaseinheit auf der Ethereum-Blockchain: vgl. Kapitel 3.2.2:
2. Ermittlung der Anzahl Gas die für die Aktion notwendig ist:
  - a. Eine Transaktion auf der Ethereum Blockchain entspricht 21.000 Gas Einheiten
  - b. Ein Handel über Uniswap V3 (Ethereum) entspricht: ca. 170.000 Gas Einheiten
3. Multiplikation von 1) und 2) ergeben die Umweltwirkung pro Transaktion.

---

<sup>49</sup> Als Proxy dient uns Uniswap als größte dezentrale Handelsplattform. Für den Handel sind aber auch andere Handelsplattformen denkbar, so setzen die beiden Beispiele auf vergleichsweise triviale Handelslösungen. Wir nutzen Uniswap als Proxy, da die Plattform durch automatisierten Handel die Liquidität erhöhen kann und eine hohe Akzeptanz genießt.

### 3.4.2 Ergebnisse

Tabelle 13 dokumentiert die Ergebnisse der quantitativen Bewertung eines Handels eines digital Green Bonds über Uniswap auf Ethereum.

**Tabelle 13: Ergebnisse der quantitativen Bewertung von Green Bonds**

Tabellenkopf	ADP (kg Sb eq.)	KSA (kWh/a)	KEA (MJ/a)	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq./a)
I: Umweltwirkung pro Gas-Einheit	$7,5 \cdot 10^{-12}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$
II: Anzahl Gas-Einheiten pro Transaktion <sup>50</sup>	170.000	170.000	170.000	170.000
<b>III: Umweltwirkung pro Transaktion (I*II)</b>	<b>0,000001</b>	<b>0,03</b>	<b>0,45</b>	<b>0,02</b>

Quelle: Eigene Berechnung.

Gemäß der Schätzung resultiert für den Handel eines digital Green Bonds ein abiotischer Ressourcenaufwand von ca. 0,001 g Sb eq., Treibhausgasemissionen von ca. 20 g CO<sub>2</sub> eq. und ein kumulierter Energieaufwand von ca. 0,4 MJ. Dies ist ca. das Achtfache im Vergleich zu einer simplen Ether-Transaktion.

Um die Zahl einordnen zu können, vergleichen wir sie mit öffentlichen Daten der Schweizer Börse. Dieser Vergleich, auch wenn nicht exakt, bietet uns die Möglichkeit, die Resultate besser einzuordnen. Sofern die meisten Ressourcen auf die Handelsfunktion konzentriert sind, sollte ein solcher Vergleich eine hilfreiche Einordnung ermöglichen.

Gemäß öffentlichen Angaben verzeichnete die Schweizer Börse im Jahr 2022 einen Energieaufwand von rund 26.000 MWh. Einschließlich weiterer Scope-3-Emissionen führte dies laut eigenen Angaben zu einem Ausstoß von etwa 26.000 t CO<sub>2</sub> eq./a (SIX 2022). Die Schweizer Börse führte 2023 zudem ca. 46 Mio. Transaktionen durch (SIX 2024). Dies entspricht somit einem GWP von ca. 0,5 kg CO<sub>2</sub> eq. pro Transaktion (SIX 2024).

Ein Handel über die dezentrale Handelsplattform Uniswap verursacht somit nur etwa 5 % der Treibhausgasemissionen im Vergleich zu einem Handel auf der Schweizer Börse. Diese Zahl liegt eher am unteren Ende, da die Schweizer Börse neben dem Handel auch weitere Dienstleistungen anbietet. Da der Handel jedoch die zentrale Funktion darstellt, erscheint es plausibel anzunehmen, dass der Handel eines digitalen Green Bonds insgesamt mit vergleichsweise geringen Umweltauswirkungen verbunden ist.

<sup>50</sup> Ein getätigter Handel auf Uniswap kostet ca. 170.000 Ethereum-Gas Einheit. Gas ist die Einheit des Ethereum-Netzwerks, die den Umfang des Rechenaufwands misst, der für die Durchführung spezifischer Operationen erforderlich ist (vgl. auch Ethereum.org 2023b). Gas hat als absolute Zahl kaum Bedeutung. Es ist eine Hilfsgröße bei der Preisfindung für verschiedene Operationen und hilft hier als Multiplikator, um die Auswirkungen unterschiedlicher Operationen zu vergleichen.

### 3.4.3 Diskussion und Fazit

Aus den Berechnungen und können folgende Schlüsse gezogen werden:

- ▶ Der Handel auf der Blockchain bietet eine innovative Möglichkeit, in Green Bonds zu investieren. Unser Modell zeigt, dass – unter der Annahme, dass die Handelsfunktion einer Börse den größten Teil der Ressourcen beansprucht – der Handel auf der Blockchain nur geringe Umweltauswirkungen hat. Im Vergleich zum Handel an traditionellen Börsen führt dieser Ansatz nicht zwangsläufig zu einer höheren Umweltbelastung.
- ▶ Der grösste Vorteil von Blockchain ggü. von klassischen Finanzinstituten ist der hohe Grad an Automatisierung und der geringe Bedarf nach Humankapital, um Geschäfte abzuwickeln. Trotz redundanter Berechnung zeigt das Beispiel die Effizienz von einer Blockchain Lösung in gewissen Anwendungsfällen.
- ▶ Das Ergebnis eines Vergleichs von Blockchain Lösungen mit klassischen Lösungen hängt von der geografischen Lage der klassischen Lösung und der Blockchain-Nodes ab. So können die Werte im Vergleich zum Handel über die deutsche Handelsplattform unterschätzt werden, da der Schweizer Strommix einen höheren Anteil an erneuerbare Energie aufweist (klimawahl.ch 2023). Umgekehrt können größere Börsen von Skaleneffekten profitieren, die einen gegenläufigen Effekt haben können. Die Schätzungen sind daher mit Vorsicht zu betrachten, die obigen Grundaussagen sind jedoch robust.

### 3.5 Zwischenfazit

Die vorangegangenen Abschnitte im Kapitel 3 erläuterten die angewandte Methodik, Ergebnisse und die Diskussion der Ergebnisse bei den ausgewählten Anwendungsfällen. Zusammenfassend lassen sich die folgenden wichtigsten Erkenntnisse festhalten:

- ▶ Proof-of-Work Blockchain Lösungen bieten eine sehr hohe Transaktionssicherheit, allerdings auf Kosten der Umwelt. Sie schneiden aus Umweltsicht deutlich schlechter ab als alternative Anwendungsfälle.
- ▶ Proof-of-Stake Blockchains sind deutlich umweltfreundlicher als Proof-of-Work Lösungen, da letztere keine Energie für die Konsensfindung und damit für die Sicherheit der Blockchain benötigen. Sie schneiden im Vergleich zu alternativen je nach Anwendungsfall besser oder schlechter ab.
- ▶ Permissioned Blockchains und ihre Anwendungen führen in der Regel zu geringeren Umweltbelastungen als permissionless Blockchains. Sie zeichnen sich meist durch eine geringe Anzahl an Nodes aus, was sie hinsichtlich des Energieaufwands effizienter macht als öffentliche Blockchains wie Ethereum. Ihre Zukunft bleibt jedoch aufgrund der geringeren Vorteile gegenüber zentralen Lösungen ungewiss.
- ▶ Der Handel auf der Blockchain bringt geringe Umweltauswirkungen mit sich und führt nicht zwangsläufig zu einer höheren Umweltbelastung im Vergleich zum Handel an traditionellen Börsen

Aus der Gesamtbetrachtung kann zudem folgendes festgehalten werden:

- ▶ Wird eine Proof-of-Stake Blockchain als rein dezentrale Rechnungslösung betrachtet, erweist sie sich aufgrund der hohen Redundanz im System im Vergleich zu zentralen Rechenzentren als ineffizient und umweltbelastender; wird eine Proof-of-Stake jedoch mit einer Plattform für Zahlungen verglichen (PayPal), so zeigt sich trotz Redundanz, eine geringere Umweltwirkung. Der Vergleich von Ethereum (sowie der Anwendungsfall Green Bonds) mit PayPal und SIX verdeutlicht, dass die Anwendung von Proof-of-Stake mindestens ebenso effizient, wenn nicht sogar effizienter ist als die zentralisierte Lösung.
- ▶ Die Umweltwirkung von Proof-of-Stake im Vergleich zu alternativen Lösungen hängt somit vom Anwendungsfall ab. Anwendungsfälle, bei denen die Sicherheit nicht im Vordergrund steht, wie z.B. bei Web3-Games, verursachen im Vergleich zu herkömmlichen Lösungen (aus Kosten-Nutzen-Sicht) relativ hohe Umweltwirkung. Umgekehrt haben sie im Vergleich zu Netzwerken, bei denen die Sicherheit im Vordergrund steht, geringere Umweltauswirkungen.

Im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen ist zudem zu beachten, dass die vorgenommene Umweltbewertung den aktuellen Stand der Blockchain-Technologien widerspiegelt. Es gibt Bestrebungen, die Effizienz der Blockchain zu erhöhen (sogenannte „L2-Lösungen“). Insbesondere für die Weiterentwicklung von Ethereum wurden bereits verschiedene Maßnahmen umgesetzt, durch die Transaktionen aggregiert werden, was einen schonenderen Umgang mit Ressourcen zur Folge hat.<sup>51</sup>

Diese dokumentierten Ergebnisse und Analysen unterliegen selbstverständlich gewissen Limitationen. In unserer Diskussion der Methodik und des Resultats haben wir auf einzelne Punkte bereits hingewiesen. Die wichtigsten Einschränkungen diskutieren wir noch einmal abschließend in Abschnitt A.5 im Appendix.

---

<sup>51</sup> Ein aktuelles Beispiel ist das sogenannte Dencun-Upgrade im Zusammenhang mit Aggregationslösungen („Layer-2 Lösungen“) des Ethereum Netzwerks, das dessen Skalierbarkeit erhöht und die redundanten Berechnungen reduziert. Die langfristige Ausrichtung von Ethereum sieht auch weitere Skalierungslösungen und die Reduktion vorhandener Redundanzen vor.

## 4 Regulatorische Herausforderungen und Anforderungen für den Einsatz von Blockchain

Der zweite Teil der Analyse wendet sich den rechtlichen Rahmenbedingungen für einen rechtssicheren und nachhaltigen Einsatz von Blockchain zu. Es wird hierzu ein dreiteiliger Ansatz verfolgt, um die rechtlichen Herausforderungen beim Einsatz von Blockchain zu untersuchen.

Erstens sollen die zivilrechtlichen Herausforderungen an den Einsatz von Blockchain-basierten Smart Contracts dargestellt und analysiert werden.

Zweitens werden Smart Contracts und Blockchain auf ihre datenschutzrechtliche Zulässigkeit hin untersucht.

Drittens werden ausgewählte regulatorische Rahmenbedingungen anhand unterschiedlicher Verwendungen der Blockchain-Technologie dargestellt. Unter Rückgriff auf die Methode der ökologischen Analyse des Rechts wird untersucht, inwiefern ausgewählte regulatorische Normen geeignet sind Anreize für eine effiziente und nachhaltige Nutzung der Technologie zu setzen. Ausgehend von dieser Analyse werden danach in einem weiteren Schritt Empfehlungen für eine Weiterentwicklung des regulatorischen Rahmens entwickelt, um eine nicht nachhaltige Nutzung der Distributed Ledger Technologie einzuschränken oder zu verhindern (vgl. Abschnitt 5).

### 4.1 Einleitende Bemerkung

Neuen Technologien wie Blockchain und DLT stellen das Recht vor neue Herausforderungen, denen entweder durch Auslegung des bestehenden Rechts oder durch eine Anpassung des Rechtsrahmens begegnet werden kann. Dem Gesetzesrecht wohnt dabei ein originärer Geltungsanspruch inne, der auch auf neue Technologien erstreckt ist (sog. **Primat des Rechts**; Kaiser, 1987, S. 40). Entgegen einer verbreiteten Ansicht in der Literatur unterliegen auch neue technologische Anwendungen wie Smart Contracts der Geltung des Rechts und müssen sich am bestehenden Recht ausrichten (Möslein, 2019, S. 266, 270; Kaulartz, 2021, Rn. 53; aA Savelyev, 2017, S. 132 f.: “[...] smart contracts [...] may operate without any overarching legal framework.”). Dieser Geltungsanspruch gilt dabei nicht allein im deutschen Recht, sondern auch für Rechtsakte der Europäischen Union.

### 4.2 Zivilrechtliche Anforderungen an die Ausgestaltung von Smart Contracts

Durch die zunehmende Verbreitung von Blockchain-Anwendungen hat auch die Verbreitung von Smart Contracts eine neue Dynamik erfahren. Smart Contracts stehen in einen besonderen assoziativen Zusammenhang zur Blockchain-Technologie (Paulus/Matzke, 2018, S. 433). Je mehr Smart Contracts aber in wirtschaftlichen Austauschprozessen implementiert werden, desto dringender stellt sich die Frage nach ihrer zivilrechtlichen Bewertung. Wenn Parteien Smart Contracts in ihre Abläufe einbauen, sind sie nicht nur auf technisch funktionierende, sondern auch rechtssichere Anwendungen angewiesen. Daher stellt sich mit zunehmender Verbreitung der Smart Contracts auch die Frage ihrer zivilrechtlichen Bewertung.

Die denkbaren Anwendungsfälle von Smart Contracts sind weit und nicht allein auf Blockchain-basierte Smart Contracts beschränkt (vgl. bspw. Siedler, 2021, Rn. 11; Kaulartz, 2021, Rn. 42 ff.). Versucht man eine **Definition** für Smart Contracts zu finden, so kann man sie als “Software, die rechtlich relevante Handlungen (insbesondere einen tatsächlichen Leistungsaustausch) in Abhängigkeit von digital prüfbar Ereignissen steuert, kontrolliert und/oder dokumentiert, mit

dessen Hilfe aber unter Umständen auch dingliche und/oder schuldrechtliche Verträge geschlossen werden können”, verstehen (Kaulartz/Heckmann, 2016, S. 619, 621). Der Versuch einer gesetzlichen Definition im europäischen Recht enthält Art. 2 Nr. 16 Data Act-Entwurf<sup>52</sup>, der sich auf die technische Darstellung konzentriert: Ein Smart Contract ist demnach *”ein in einem elektronischen Vorgangsregistersystem gespeichertes Computerprogramm, bei dem das Ergebnis der Programmausführung in dem elektronischen Vorgangsregister aufgezeichnet wird”*. Wie diese Definitionsversuche bereits zeigen, ist der Einsatz von Smart Contracts technologieneutral und **nicht auf Blockchain-Anwendungen beschränkt** (Braegemann/Kaulartz, 2019, Rn. 24). Das klassische Beispiel für nicht-blockchainbasierte Smart Contracts sind Warenautomaten (Schreyer/Thalhofer, 2017, S. 1431; Raskin, 2017, S. 314). Sie enthalten sowohl ein Programm zum automatisierten Vertragsschluss als auch zur (teilweisen) automatisierten Vertragsdurchführung.

**Ziel** dieses Analyseteils ist die Untersuchung, ob die zivilrechtlichen Regelungen eine rechtssichere Ausgestaltung und Anwendung von Smart Contracts ermöglichen. Hierzu soll die Analyse auf Blockchain-basierte Smart Contracts beschränkt werden. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf den Anforderungen, die aufgrund der Blockchain-spezifischen Charakteristika an die Vertragsgestaltung und die Ausgestaltung von Smart Contracts zu stellen sind.

Das Zivilrecht ist vom öffentlichen Recht und dort insbesondere vom öffentlichen Wirtschaftsrecht abzugrenzen. Öffentliches Recht ist das Sonderrecht des Staates, das sich nach der modifizierten Sonderrechtslehre dadurch auszeichnet, dass es allein staatliche Stellen berechtigt oder verpflichtet (Wolff/Bachof/Stober/Kluth, 2017, § 22 Rn. 28; Säcker 2021, Rn. 3). Der Normbestand des allgemeinen deutschen Zivilrechts setzt sich aus dem **Bürgerlichen Gesetzbuch (BGB)**<sup>53</sup> und seinen **Nebengesetzen** zusammen (vgl. Übersicht bei Säcker, 2021, Rn. 1). Daneben bestehen verschiedene sonderprivatrechtliche Normen, die spezielle Tätigkeiten, Unternehmen oder Berufsgruppen adressieren (Säcker, 2021, Rn. 1). Im weiteren Fortgang beschränkt sich die Analyse auf das allgemeine Zivilrecht; Fragen des Regulierungsrechts sollen in einem späteren Analyseteil (vgl. Abschnitt 4.4) behandelt werden.

### Anwendbarkeit des deutschen Zivilrechts

Bevor eine zivilrechtliche Bewertung von Smart Contracts vorgenommen werden kann, ist die Eröffnung des **Anwendungsbereichs des deutschen Zivilrechts** festzustellen. Vor dem Hintergrund der Internationalität des digitalen Rechtsverkehrs und insbesondere des Einsatzes von DLT ist die Anwendbarkeit des deutschen Zivilrechts im jeweiligen Einzelfall zu klären. Es lassen sich aber einige allgemeine Wertungen treffen. Als Rechtsquellen des Internationalen Zivilverfahrensrechts und des Internationalen Privatrechts dienen – neben weiteren bereichsspezifischen Normen – für das Verfahrensrecht die **Brüssel-Ia-VO**<sup>54</sup> bzw. die **§§ 12 ff. ZPO** (Toussaint, 2023, § 32b Rn. 26 f.) und für die Bestimmung des anwendbaren Rechts die **Rom-I**<sup>55</sup> bzw. **Rom-II-VO**<sup>56</sup>, sowie die Vorschriften des **EGBGB**.

52 Vorschlag der EU-Kommission v. 23.02.2022 für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über harmonisierte Vorschriften für einen fairen Datenzugang und eine faire Datennutzung (Datengesetz), COM (2022) 68 final.

53 Bürgerliches Gesetzbuch idF der Bekanntmachung vom 02.01.2002, BGBl. I S. 42, 2909; 2003 I S. 738, zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 14.03.2023, BGBl. 2023 I Nr. 72.

54 VERORDNUNG (EU) Nr. 1215/2012 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES v. 12.12.2012 über die gerichtliche Zuständigkeit und die Anerkennung und Vollstreckung von Entscheidungen in Zivil- und Handelssachen, ABl. 2012 L 351/1.

55 VERORDNUNG (EG) Nr. 593/2008 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17.06.2008 über das auf vertragliche Schuldverhältnisse anzuwendende Recht, ABl. 2008 L 177/6.

56 VERORDNUNG (EG) Nr. 864/2007 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11.07.2007 über das auf außervertragliche Schuldverhältnisse anzuwendende Recht, ABl. 2007 L 199/40.

Die Bestimmung des anwendbaren Rechts ist unter Anwendung dieser Normen auch im Zusammenhang mit Blockchain-Anwendungen, insbesondere von Smart Contracts, regelmäßig unproblematisch (Rühl, 2019, Rn. 41 m. w. N.). Die Normen des Kollisionsrechts fragen häufig nach Anknüpfungspunkten, die sich an den Anwendungsfällen der Technologie und weniger an der technologischen Ausgestaltung als solche orientieren (Steinrötter, 2020, § 3 Rn. 6 ff.). Dass die Anwendungen auf Blockchain basieren, ist hierfür meist unerheblich (Rühl, 2019, Rn. 5). Vorliegend soll die Anwendbarkeit des deutschen Zivilrechts unterstellt werden.

### **Zivilrechtliche Anforderungen an Smart Contracts**

Bei Smart Contracts handelt es sich nicht um einen eigenen Vertragstyp iSd Zivilrechts. Die potenziellen Anwendungsbereiche von Smart Contracts sind vielfältig und nicht lediglich auf einen bestimmten Vertragstyp beschränkt. Sie können bspw. bei der Durchführung von Kauf-, Miet- oder Leasingverträgen zum Einsatz kommen.

Entgegen dem irreführenden Namen handelt es sich bei Smart Contracts **nicht um Verträge im rechtlichen Sinne**, sondern lediglich um **Computerprogramme**, die vorher festgelegte Bedingungen ausführen und beim Vertragsschluss oder bei dessen Durchführung zur Anwendung kommen (Kaulartz/Heckmann, 2016, S. 618; Heckelmann, 2018, S. 504; Paulus/Matzke, 2018, S. 431, 433; Möslein, 2019, S. 264; Fries, 2021, § 9 Rn. 1; Siedler, 2021, § 7 Rn. 11). Bei Blockchain-basierten Smart Contracts tritt die Besonderheit hinzu, dass die Computerprogramme aufgrund ihrer dezentralen Speicherung und der Unveränderbarkeit der Blockchain-Inhalte nachträglich nicht mehr verändert werden können.

Die **technische Ebene** und die **rechtliche Ebene** sind bei der rechtlichen Beurteilung von Smart Contracts zu **trennen**. Der Smart Contract als Programmcode ist vergleichbar mit dem Papier, auf dem der Vertragstext eines "klassischen" Vertrages geschrieben ist (Riehm, 2019, Kap. 9 Rn. 2). In dem Computerprogramm werden die vertraglichen Regelungen festgehalten. Der eigentliche Inhalt des rechtlichen Vertrages ist aber von den technischen Regelungen zu trennen. Technische Durchsetzbarkeit und rechtliche Wirksamkeit können auseinanderfallen (Möslein, 2019, S. 270).

Entscheidend für die rechtliche Bewertung ist in erster Linie der Inhalt dieses rechtlichen Vertrages, auf den sich die Parteien geeinigt haben (Fries, 2021, § 9 Rn. 20). Der Inhalt dieses rechtlichen Vertrages muss nicht notwendig mit den technischen Regelungen des Smart Contracts identisch sein. Unter Umständen kann der Programmcode aber den Inhalt des rechtlichen Vertrages beeinflussen. Es handelt sich um eine zentrale Frage der zivilrechtlichen Beurteilung von Smart Contracts, wie der Inhalt des Programmcodes die rechtliche Ebene beeinflussen kann.

Hinsichtlich der zivilrechtlichen Anforderungen im Zusammenhang mit blockchainbasierten Smart Contracts lassen sich zwei Einsatzformen der Smart Contracts unterscheiden: Einerseits können Smart Contracts auf der Ebene der Vertragsbegründung als Werkzeug zum Austausch von Willenserklärungen zur Anwendung gelangen. Andererseits werden Smart Contracts auch nur zur Durchführung eines bereits abgeschlossenen Vertrages eingesetzt (vgl. Fries, 2021, § 9 Rn. 18).

#### 4.2.1 Vertragsschluss unter Einsatz von Smart Contracts

Der Abschluss eines Vertrages durch den Einsatz von Smart Contracts ist an den zivilrechtlichen Anforderungen an den Vertragsschluss zu messen. Damit überhaupt von einem Vertrag im rechtlichen Sinne gesprochen werden kann, müssen die Voraussetzungen für den Vertragsschluss vorliegen. Andernfalls würde es sich bei dem Smart Contract lediglich um ein Computerprogramm handeln, das einem Vertrag ähnelt, ohne jedoch rechtliche Wirkungen zu erzeugen (Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 1). Ob die Voraussetzungen für einen Vertragsschluss gegeben sind, ist im konkreten Einzelfall zu prüfen. Vorliegend sollen lediglich die vom Einzelfall losgelösten Rechtsfragen dargestellt werden.

##### Willenserklärung

Das Zustandekommen eines rechtswirksamen Vertrages setzt das Vorliegen mindestens zweier Willenserklärungen voraus (Angebot und Annahme, vgl. Brox/Walker, 2022, § 4 Rn. 14). Ähnlich wie bei Warenautomaten wird es sich aber auch bei Smart Contracts auf einer Blockchain um eine **invitatio ad incertis personas**<sup>57</sup> handeln, sodass der Anbietende an die Erklärung gebunden ist und der Vertrag mit Zugang der Annahme rechtswirksam geschlossen wird (Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 19).

Damit ein wirksames Angebot überhaupt vorliegen kann, müssen die Voraussetzungen der Willenserklärung erfüllt sein. Unter einer Willenserklärung versteht man eine "private Willensäußerung, die auf die Erzielung einer Rechtsfolge gerichtet ist" (Angebot und Annahme, vgl. Brox/Walker, 2022, § 4 Rn. 14). Die Willenserklärung muss dabei die Anforderungen an den äußeren und inneren Erklärungstatbestand erfüllen.

Der äußere Erklärungstatbestand ist regelmäßig auch beim Einsatz von Smart Contracts erfüllt, wenn durch den Smart Contract lediglich eine Erklärung in menschlicher Sprache<sup>58</sup> elektronisch übermittelt wird. Problematisch kann das Vorliegen des **äußeren Erklärungstatbestandes** dann sein, wenn neben dem Programmcode keine zusätzliche Erklärung in menschlicher Sprache abgegeben wurde und die rechtserhebliche Erklärung nur in maschinenlesbarer Sprache auf der Ebene des Programmcodes festgehalten wurde (Möslein, 2019, S. 271).

Teilweise wird die Ansicht vertreten, dass der äußere Erklärungstatbestand der Willenserklärung nur dann erfüllt sei, wenn eine Erklärung in menschlicher Sprache gegeben sei. Dem gegenüber vertritt eine andere Ansicht, dass die Abbildung der Willensäußerung im Programmcode ausreiche, um die Anforderungen des äußeren Erklärungstatbestandes zu erfüllen (Möslein, 2019, S. 271).

Für die letztgenannte Ansicht spricht, dass in rein analogen Sachverhalten reines Verhalten regelmäßig ausreicht, um eine Willenserklärung zu begründen (z.B. das Heben einer Hand bei einer Versteigerung, Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 7, 20). Der Programmcode, der aber auch Bedingungen und Regeln definieren kann, ist mehr als das schlüssige Verhalten und muss daher erst recht den äußeren Tatbestand einer Willenserklärung bilden können (Kaulartz/Heckmann, 2016, S. 621 f.; Heckmann, 2018, S. 505; Möslein, 2019, S. 271; Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 7). Programmiersprachen seien daher wie Fremdsprachen zu behandeln, die durchaus eine Willenserklärung begründen können (Kaulartz/Heckmann, 2016, S. 621 f.; Möslein, 2019, S. 271; Riehm, 2019, Kap. 9 Rn. 2). Das Risiko, ob der Empfangende die im Programmcode niedergelegte Willensäußerung versteht, kann nicht dem Entäußernden der Willensäußerung auferlegt werden. Lässt sich der sprachunkundige Empfangende auf den Einsatz von Smart

<sup>57</sup> Latein: "Angebot an unbestimmte Personen".

<sup>58</sup> "Menschliche Sprache" wird vorliegend in Abgrenzung zu "maschinenlesbarer Sprache" im Sinne einer Programmiersprache verstanden.

Contracts ein, ohne den Inhalt der Erklärung zu verstehen, so ist ihm das Risiko des fehlenden Verständnisses aufzuerlegen. Der sprachunkundige Empfangende ist mit einer Person vergleichbar, die den Vertrag ungelesen unterzeichnet (zum Ganzen: Kaulartz/Heckmann, 20176, S. 621 f.).

Neben dem äußeren Erklärungstatbestand müssen die Anforderungen an den **inneren Erklärungstatbestand** erfüllt sein. Hinsichtlich des inneren Erklärungstatbestandes können im Zusammenhang mit Smart Contracts drei Fallkonstellationen (elektronisch übermittelte, automatisierte und autonome Willenserklärung) unterschieden werden. Entscheidend ist dabei die *Modalität* der Erzeugung der Willenserklärung.

Eine elektronisch übermittelte Erklärung liegt dann vor, wenn die Vertragspartei die Transaktion **manuell** in ihrer Wallet **signiert** und dadurch die Transaktion bestätigt und freigibt (Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 18). In einem solchen Fall initiiert die Nutzerin bewusst durch ihre Signatur den Vorgang, der auf der Ebene der Blockchain zur Freigabe der Transaktion und Eingabe des Private Keys führt. Eine auf diese Weise abgegebene Willensäußerung ist als Willenserklärung zu qualifizieren.

Besonderheiten ergeben sich hier erst, wenn die Willenserklärung ohne Zutun eines Menschen *automatisiert* oder *autonom* erzeugt wird. In diesen Fällen ist die Abgabe der Willenserklärung auf der Ebene des Smart Contracts allein dem Computerprogramm überantwortet, ohne dass ein Mensch im konkreten Einzelfall die Abgabe der Willenserklärung bestätigen muss. In diesen Fällen unterscheidet man zwischen **automatisierten** bzw. **autonomen Willenserklärungen** (zur Unterscheidung: Taeger, 2016, S. 3764 f.; Specht/Herold, 2018, S. 40 ff.).

*Automatisierte Willenserklärungen* liegen vor, wenn die Bedingungen für die Abgabe bereits vorab festgelegt sind und das System lediglich die Bedingung ausführt (Wenn-dann) (Taeger, 2016, S. 3765; Specht/Herold, 2018, S. 41 ff.; Heckelmann, 2018, S. 506; Möslein, 2019, S. 272). Hierbei wird es sich regelmäßig um einen typischen Bestandteil von Smart Contracts handeln, da gerade ein Vorteil der Smart Contracts in der automatisierten Abwicklung der vertraglichen Vereinbarung nach Eintritt der Bedingung liegt (z.B.: bei Zahlung des schuldrechtlich vereinbarten Kaufpreises, werden die sachenrechtlich notwendigen Erklärungen für den Übergang des Eigentums automatisiert abgegeben, Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 17). Automatisierte Willenserklärungen sind aufgrund ihrer Nähe zur bedingten Willenserklärung als **vom inneren Erklärungstatbestand umfasst** anzusehen (Heckelmann, 2018, S. 506; Paulus/Matzke, 2018, S. 440 f.; Möslein, 2019, S. 273). Die automatisierte Abgabe der Willenserklärung steht der Wirksamkeit des Vertragsschlusses mithin nicht entgegen.

Problematisch ist, dass der Smart Contract in der Regel nicht unterscheidet, ob eine Interaktion zwischen einem tatsächlichen Akteur außerhalb der Blockchain (natürliche [nat.] oder juristische [jur.] Person) oder einem anderen Smart Contract ausgeführt wird (Koch/Reitwiessner, 2019, Kap. 5 Rn. 9). Um eine rechtlich wirksame Willenserklärung zu gewährleisten, muss diese jedoch immer zu einem **Rechtssubjekt** zurückführbar sein. Die jeweilige Zuordnung der Erklärung ist Einzelfall durch eine Zurechnung der Erklärung zu einem Rechtssubjekt zu ermitteln.

Unerheblich ist, dass Willenserklärungen unter Einsatz von Smart Contracts üblicherweise **pseudonymisierte** abgegeben werden. Regelmäßig ist den Vertragsparteien lediglich der Public Key des jeweiligen Gegenübers bekannt, ohne dass die Identität der dahinterstehenden natürlichen oder juristischen Person geklärt ist.

In den Fällen eines sofortigen Vollzugs des Geschäfts ist dieser Umstand jedoch ohne Bedeutung. Die Parteien kontrahieren unter Verwendung der Pseudonyme mit der Person, die hinter dem Public Key zu verorten ist.

Im Ergebnis ist die Abgabe von Willenserklärungen unter Einsatz von Smart Contracts regelmäßig rechtswirksam möglich.

### Zugang der Willenserklärung, §§ 147, 151 BGB

Damit ein Vertrag wirksam zustande kommen kann, muss eine empfangsbedürftige Willenserklärung darüber hinaus auch **zugehen**. Die Annahme eines Angebots zum Abschluss eines Vertrages ist eine empfangsbedürftige Willenserklärung, die erst wirksam wird, wenn sie zugeht (vgl. §§ 146 ff. BGB, Brox/Walker, 2022, § 8 Rn. 16 f.; Einsele, 2021, § 130 Rn. 16).

Bei dem Einsatz von Smart Contracts auf einer Blockchain ist der **Zeitpunkt des Zugangs** der Willenserklärung fraglich. Die Willenserklärung ist zugegangen, wenn sie so in den **Machtbereich** des Empfängers gelangt ist, dass dieser bei Annahme normaler Verhältnisse von ihrem Inhalt Kenntnis nehmen kann (st. Rspr. vgl. nur BGH Urt. v. 26.11.1997 - VIII ZR 22/97 = BGHZ 137, 205 (208) = NJW 1998, 976 (977); BGH Beschl. v. 21.06.2011 - II ZB 15/10 = NJW-RR 2011, 1184 Rn. 15; Einsele, 2021, § 130 Rn. 16; Gomille, 2022, § 130 Rn. 48).

Das wirft bei Smart Contracts auf einer Blockchain Probleme auf. Blockchains sind **dezentral** organisiert, wodurch dem Empfangenden **kein eigener Machtbereich** zugeordnet werden kann (Möslein, 2019, S. 275 f.). Kenntnis von der Willenserklärung solle er vielmehr erst dann erlangen, wenn der Block mit der Erklärung an die Blockchain angehängt wird (Heckelmann, 2018, S. 505 f.; Möslein, 2019, S. 276; Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 19; Schnell/Schwaab, 2021, S. 1093 Fn. 30).

Schwierigkeiten bereitet diese Frage jedoch vor dem Hintergrund der technischen Möglichkeit von sog. **Forks**, d.h. der Aufspaltung der Blockchain in unterschiedliche Zweige. Dieses Problem will ein Teil der Literatur allein auf der Ebene der Sachverhaltsermittlung ansiedeln, indem ermittelt werden soll, auf welchen Zweig der Empfänger Zugriff hatte (Möslein, 2019, S. 276). Ob die Erklärung tatsächlich dauerhaft auf der Blockchain abgespeichert wurde, ist unerheblich (Paulus/Matzke, 2018, S. 447 f.). Entscheidend ist für die rechtliche Bewertung allein, dass der Empfangende Kenntnis hatte oder erlangen konnte. Andere gehen davon aus, dass die Erklärung schwebend unwirksam sei, bis nach gewisser Zeit davon ausgegangen werden könne, welcher Zweig der aktuelle ist (Heckelmann, 2018, S. 505 f.). Der letztgenannten Erklärung fehlt es jedoch an dogmatischen Anknüpfungspunkten (Möslein, 2019, S. 276). Im Übrigen verhindert auch sie nicht das Erfordernis einer Rückabwicklung des Vertrages, wenn es am Zugang fehlt (Heckelmann, 2018, S. 506). Sie ist daher im Ergebnis abzulehnen, sodass im Falle von Forks die Frage des Zugangs danach zu bestimmen ist, **auf welchen Zweig der Empfangende zum entscheidenden Zeitpunkt Zugriff hatte**.

Die Frist für die Annahme der Willenserklärung richtet sich bei Smart Contracts nach § 147 Abs. 2 BGB. Bei Blockchain-basierten Vertragsschlüssen liegt kein Fall des § 147 Abs. 1 S. 2 BGB vor, da es für die Fälle einer sonstigen technischen Einrichtung an der Möglichkeit zum zeitgleichen Verhandeln fehlt (Möslein, 2019, S. 275; Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 19; allgemein Busche, 2021, § 147 Rn. 31; Möslein, 2018, § 147 Rn. 23). Regelmäßig wird in den Fällen des Einsatzes von Smart Contracts jedoch nach § 151 BGB der Verzicht auf den Zugang der Annahmeerklärung anzunehmen sein (Möslein, 2019, S. 275; Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 19).

### **Nichtigkeit wegen Formmangel, § 125 BGB**

Unter Umständen setzt die Wirksamkeit von Willenserklärungen darüber hinaus das Vorliegen einer bestimmten Form voraus. Gem. §§ 145 ff. BGB sind Rechtsgeschäfte **grundsätzlich formfrei** möglich. Etwas anders gilt gem. § 125 S. 1 BGB, wenn für ein Rechtsgeschäft durch Gesetz eine **Form vorgeschrieben** ist. Mangelt es diesem Rechtsgeschäft an der vorgeschriebenen Form, so ist es gem. § 125 S. 1 BGB nichtig. Gleiches gilt im Zweifel auch, wenn es dem Rechtsgeschäft an der vereinbarten Form mangelt, § 125 S. 2 BGB. Es ist daher zu prüfen, inwieweit Erklärungen unter Einsatz von Smart Contracts die gesetzlichen Formvorgaben einhalten können.

Die Form der **notariellen Beurkundung**, § 128 BGB und der **öffentlichen Beglaubigung**, § 129 BGB scheiden in Ermangelung der Einbeziehung eines Notars oder Gerichts von vorneherein aus (Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 11). Der Einsatz von Smart Contracts für Verträge, die dieser gesteigerten Formanforderung bedürfen, ist damit für die Ebene des Vertragsschlusses ausgeschlossen. Für die Vertragsdurchführung können sie jedoch weiterhin zum Einsatz kommen (Heckelmann, 2018, S. 507; Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 11).

Die **Schriftform** setzt die eigenhändige Namensunterschrift unter eine Urkunde voraus, § 127 Abs. 1 BGB. Eigenhändig meint in diesem Zusammenhang handschriftlich; eine eingescannte Unterschrift reicht in der Regel nicht aus, ebenso wenig ein bloß elektronisch vorliegendes Dokument (BGH Urt. v. 09.11.2007 - V ZR 25/07 = NJW 2008, 506 Rn. 13; Einsele, 2021, § 126 Rn. 7, 15). Bei Smart Contracts wird es regelmäßig schon an der Unterschrift fehlen. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob eine in Schriftzeichen verkörperte, lesbare Erklärung vorliegt (Schnell/Schwaab, 2021, S. 1094 m. w. N.). Folglich sind die Voraussetzungen des § 127 Abs. 1 BGB regelmäßig nicht gewahrt (i. Erg. ablehnend zu allen drei Formen: Heckelmann, 2018, S. 507; Djazayeri, 2016, Anm. 1).

Unter Umständen kann die Schriftform zwar durch die **elektronische Form** ersetzt werden, § 127 Abs. 3 BGB. Diese setzt jedoch das Vorliegen einer qualifizierten elektronischen Signatur voraus, § 126a Abs. 1 BGB i. V. m. Art. 3 Nr. 12 eIDAS-VO. Die Erfüllung der elektronischen Form ist technisch nicht von vorneherein ausgeschlossen (Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 13). Es ist im Einzelfall zu klären, ob die Voraussetzungen erfüllt sind.

Jedenfalls die **Textform**, § 126b BGB dürfte in der Regel erfüllt sein (Heckelmann, 2018, S. 507: nur Textform, § 126b BGB; ebenso Paulus/Matzke, 2018, S. 457; ausführlich bei Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 12). Teilweise wird auch vorgeschlagen die formgebundene Erklärung (z.B. Bürgschaftserklärungen, § 766 BGB) außerhalb der technischen Gestaltung abzugeben, um formgebundene Rechtsgeschäfte dennoch zu ermöglichen (Heckelmann, 2018, S. 507). Die jeweilige Erklärung wäre dann in den Smart Contract einzubinden, um einen Gleichlauf von technischer und rechtlicher Lage sicherzustellen. Aus rechtlicher Sicht scheint diese Konstruktion jedenfalls vorzugswürdig, möchte man formgebundene Rechtsgeschäfte ermöglichen. Unter Umständen können die Parteien sogar vereinbaren, dass die Darstellung des Rechtsgeschäfts Wirksamkeitsvoraussetzung wird (§ 311 Abs. 1 BGB, vgl. Paulus/Matzke, 2018, S. 457 f.).

### **Auslegung der Willenserklärung, §§ 133, 157 BGB**

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass auch unter Einsatz von Smart Contracts wirksame rechtliche Verträge zustande kommen können. Neben dem Vorliegen einer Willenserklärung und ihrer Wirksamkeit, ist dann insbesondere ihr rechtlicher Inhalt für den Umgang mit dem jeweiligen Vertrag entscheidend. Die zentrale Problematik stellt sich hier, wenn neben dem Smart Contract als Programmcode kein weiterer "klassischer" Vertrag geschlossen wurde, sodass der Vertragsinhalt lediglich in dem Smart Contract (Programmcode) abgebildet wird (Riehm, 2019, Kap. 9 Rn. 2).

Kommt es zu Unklarheiten über den Inhalt des Vertrages, so ist dieser durch Auslegung der Willenserklärungen, gem. §§ 133, 157 BGB zu ermitteln. Ziel der Auslegung ist die Ermittlung des Inhalts der Erklärung, „wie der Erklärungsempfänger die Erklärung nach Treu und Glauben und mit Rücksicht auf die Verkehrssitte verstehen musste“ (BGH Urt. v. 16.10.2012 – X ZR 37/12 = NJW 2013, 598 Rn. 18; Urt. v. 18.12.2008 - I ZR 23/06 = NJW 2009, 774 Rn. 25; Busche, 2021, § 133 Rn. 12). Entscheidend ist folglich nicht, wie das Computerprogramm die Erklärung verstehen würde, sondern der jeweilige menschliche Empfänger (BGH Urt. v. 16.10.2012 - X ZR 37/12 = MMR 2013, 296 Rn. 17; Siedler, 2021, § 7 Rn. 13).

Dabei ist fraglich, ob auch der Inhalt des Programmcodes bei der Auslegung berücksichtigt werden kann. *Möslein* spricht sich dafür aus, dass im Sinne einer Betrachtung der Gesamtheit aller Umstände **auch der Programmcode** bei der Auslegung der Erklärung berücksichtigt werden muss (Möslein, 2019, S. 276 f.; Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 23; aA Fries, 2021, § 9 Rn. 20). Ziel der Auslegung müsse es sein, dem Zweck der vertraglichen Vereinbarung bestmöglich zur Wirksamkeit zu verhelfen (Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 23). Widersprechen sich der Code und die Erklärung in menschlicher Sprache gar, so könne dem technischen Code unter Umständen sogar der Vorrang eingeräumt werden, wenn dadurch der Inhalt von unklaren menschlichen Erklärungen bestimmt werden kann (Möslein, 2019, S. 277).

Entscheidend für die Frage der Einbeziehung des Programmcodes in die Auslegung ist das zu erwartende Verständnis des Empfängers nach der Verkehrssitte (Vgl. BGH Urt. v. 27.01.2010 - VIII ZR 58/09, NJW 2010, 2422 Rn. 33; Urt. v. 16.10.2012 – X ZR 37/12, NJW 2013, 598 Rn. 18). Richtet sich die Erklärung an einen Empfangendenkreis, der regelmäßig den Programmcode verstehe, so könne dieser auch bei der Auslegung berücksichtigt werden (Möslein, 2019, S. 277; Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 24). Aufgrund des unbestimmten Empfangendenkreises der Erklärung, seien hier objektivierte Maßstäbe anzulegen. Unter Umständen wird sogar davon ausgegangen, dass bei der Gestaltung eines Rahmenvertrages über die Nutzung von Smart Contracts die alleinige Verbindlichkeit des Programmcodes vereinbart werden könnte (Schnell/Schwaab, 2021, S. 1097).

Im Ergebnis ist daher regelmäßig neben der menschlichen Erklärung auch der Programmcode bei der Auslegung der Willenserklärungen zu berücksichtigen (Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 24: spricht von einer künftigen Obliegenheit des Nutzers "to understand the Code").

### **Anfechtbarkeit, §§ 119 ff., 142 ff. BGB**

Zwar handelt es sich bei Anfechtungsfragen um keine Voraussetzung eines rechtswirksamen Vertragsschlusses. Für den Umgang mit Willensmängeln ergibt sich aber regelmäßig eine praktische Notwendigkeit, um alle typische Konstellation im Zusammenhang mit dem Abschluss von Verträgen zu erfassen. Blockchain-spezifische Fragen der Anfechtung stellen sich vor allem dort, wo der Irrtum aufgrund eines Software-Fehlers eintritt.

Ein Programmierfehler oder ein Fehler im verwendeten Datenmaterial allein stellt keinen Irrtum iSd § 119 BGB dar, sondern ist lediglich als unbeachtlicher **Motivirrtum** zu qualifizieren (Paulus/Matzke, 2018, S. 456). In dem vom eigentlichen Willen der Vertragspartei abweichende

Inhalt der Erklärung schlägt sich der Programmierfehler auf dem Smart Contract nieder. Dieser Inhalt der Willenserklärung kann den Betroffenen aber dennoch zugerechnet werden. Durch den Einsatz des Smart Contracts bringen Betroffene einen generellen Einsatzwillen zum Ausdruck, der sich auf alle potenziellen autonomen Erklärungen des Programms erstreckt.

Eine Anfechtung kommt nur dort in Betracht, wo Betroffene Daten fehlerhaft eingeben (vgl. Paulus/Matzke, 2018, S. 455).

Häufig wird im Zusammenhang mit der Anfechtung auch die Rückabwicklung des angefochtenen Vertrages diskutiert. Dabei handelt es sich aber richtigerweise nicht um eine Frage der Anfechtung, sondern der Rückabwicklung von Verträgen gem. §§ 812 ff. BGB (s. unten). Entscheidend ist lediglich die Erklärung der Anfechtung gem. § 143 Abs. 1 BGB, die das Rechtsgeschäft gem. § 142 Abs. 1 BGB von Anfang an vernichtet. Für die Anfechtungserklärung ist es ratsam, dass die Erklärung auch auf der Blockchain vermerkt wird, um weitere Verfügungen zu verhindern (Schnell/Schwaab, 2021, S. 1094).

### **Allgemeine Geschäftsbedingungen, §§ 305 ff. BGB**

Neben den behandelten Fragen der Rechtsgeschäftslehre tritt auch die Frage, ob Smart Contracts Allgemeine Geschäftsbedingungen (AGB) darstellen und falls man die Frage bejaht, ob typische Bestandteile von Smart Contracts einer Inhaltskontrolle standhalten können.

Smart Contracts werden regelmäßig für eine Vielzahl von Fällen verwendet. So werden beispielsweise konkrete Programmvorschlüsse aus einer "Bibliothek" entnommen und in den Programmcode eingebunden. Daher liegt eine Einordnung als AGB iSd § 305 BGB nahe. Ob dabei auch die Anforderungen an AGB erfüllt sind, ist im Folgenden zu untersuchen. Hinsichtlich der AGB-Kontrolle ist gem. § 310 Abs. 3 BGB zwischen Verbrauchern (§ 13 BGB) und Unternehmern (§ 14 BGB) als Vertragsparteien zu unterscheiden. Für Verträge zwischen Verbrauchern und Unternehmen (sog. Verbraucherverträge) werden strengere Maßstäbe angelegt. Dies ist im Einzelfall zu berücksichtigen.

Wird neben dem Smart Contract ein "klassischer" Vertrag geschlossen, so ergeben sich regelmäßig keine Besonderheiten hinsichtlich der AGB-Kontrolle. Zu beachten ist jedoch, dass es sich bei einer Klausel, die die Vertragsdurchführung mittels Smart Contract anordnet, regelmäßig um eine überraschende Klausel iSd § 305c BGB handeln dürfte, solange die automatisierte Vertragsdurchführung mittels Smart Contract noch keine flächendeckende Verbreitung erlangt hat (Fries, 2021, § 9 Rn. 24). Sie ist daher besonders hervorzuheben.

Besonderheiten können sich für die AGB-Kontrolle jedoch ergeben, wenn die vertraglichen Bedingungen **lediglich mittels Programmcode** niedergelegt werden. Hier ist zu prüfen, ob die im Programmcode niedergelegten Bedingungen überhaupt AGB darstellen können (Kaulartz/Heckmann, 2016, S. 622; Schrey/Thalhofer, 2017, S. 1436; Heckelmann, 2018, S. 507). AGB werden in § 305 Abs. 1 S. 1 BGB definiert als "alle für eine Vielzahl von Verträgen vorformulierten Vertragsbedingungen, die eine Vertragspartei (Verwender) der anderen Vertragspartei bei Abschluss eines Vertrags stellt." Hier regt sich bereits Widerstand. Nach Ansicht einiger Autoren würden **mangels Vertragsbestandteils** des Programmcodes keine AGB vorliegen (Paulus/Matzke, 2018, S. 459). Vorliegend wurde jedoch bereits gezeigt, dass es sich auch bei bloßem Programmcode um eine Willenserklärung handeln kann. Darüber hinaus stellt § 305 Abs. 1 S. 2 BGB klar, dass es auf die äußerliche Darstellung der Bedingungen gerade nicht ankommt. Ob der Programmcode Vertragsbestandteil wurde, ist vielmehr eine Frage der Einbeziehung als der Qualifikation des Codes als Vertragsbestandteil.

Voraussetzung für das Vorliegen von AGB ist jedenfalls, dass die in Rede stehenden Bestandteile für eine **Vielzahl von Verträgen** verwendet werden und nicht individuell für den konkreten

Einsatz programmiert wurden (Heckelmann, 2018, S. 507). Darüber hinaus müssen die AGB von einem Verwender gestellt werden. Dies ist im Einzelfall zu bestimmen. Unschädlich ist dabei, dass der Code von einer dritten Partei programmiert wurde (vgl. zu Formulklauseln BGH, Urt. v. 16.11.1990 - V ZR 217/89, NJW 1991, 843; BGH Urt. v. 04.05.2000 - VII ZR 53/99, NJW 2000, 2988 (2989)).

Liegen AGB vor, so müssen sie gem. § 305 Abs. 2 BGB in den Vertrag **einbezogen** worden sein, d.h. die andere Partei muss Kenntnis von den AGB-Bestimmungen erhalten (Siedler, 2021, § 7 Rn. 12). Dies kann fragwürdig sein, wenn die Ausgestaltung des Smart Contracts allein als Programmcode vorliegt, ohne dass der Vertrag in normaler Sprache abgefasst ist. Im Falle eines Verbrauchervertrages seien die AGB dann aufgrund von § 305 Abs. 2 Nr. 2 BGB oder jedenfalls § 307 Abs. 1 S. 2 BGB regelmäßig nicht Bestandteil des Vertrages geworden (Kaulartz/Heckmann, 2016, S. 622; Möslein, 2019, S. 279; Schmalenberg, 2022, S. 363; teilweise aA Riehm, 2019, Kap. 9 Rn. 37, der unter Umständen auch den Programmcode für ausreichend hält). Im Falle eines Vertrages zwischen Unternehmern gibt es gem. § 310 Abs. 1 S. 1 BGB keine besonderen Vorschriften für die Einbeziehungskontrolle. Hier gelten die §§ 145 ff. BGB (s. oben).

Wurden die Bestimmungen Bestandteil des Vertrages, so sind sie der **Inhaltskontrolle** gem. §§ 308 f. BGB unterworfen, sofern die Anforderungen des § 307 Abs. 3 BGB erfüllt sind. Für Verträge zwischen Unternehmern finden sie gem. § 310 Abs. 1 S. 1 BGB keine Anwendung.

Ferner sind die AGB an § 307 Abs. 1, 2 BGB zu messen. Besondere Anforderungen stellt hierbei das **Transparenzgebot** gem. § 307 Abs. 1 S. 2 BGB. Liegen die Vertragsbestandteile nur als Programmcode vor, so kann es an der Verständlichkeit der AGB fehlen (Siedler, 2021, § 7 Rn. 12). Das kann pauschal nicht angenommen werden, sondern ist nach dem jeweiligen Einzelfall zu beurteilen, da durchaus Situationen denkbar sind, in denen auch reiner Code "klar und verständlich" sein kann (Riehm, 2019, Kap. 9 Rn. 27 f.). Nur in den zuerst genannten Fällen wären die AGB gem. § 307 Abs. 1 BGB unwirksam und folglich gem. § 306 Abs. 1 BGB nicht Teil des Vertrages.

Weitere problematische Fälle, die sich auch bei Smart Contracts auf der Ebene der reinen Vertragsdurchführung stellen, sind sog. **Selbstdurchsetzungsklauseln** und **Preisanpassungsklauseln**. Sie sind typischerweise Bestandteile eines Smart Contracts und sollen daher hier beispielhaft behandelt werden.

**Selbstdurchsetzungsklauseln** können gem. § 307 Abs. 1 BGB unangemessen sein, da sie die Klage- und damit auch regelmäßig die Beweislast umkehren (Möslein, 2019, S. 280 m. w. N.; Riehm, 2019, Kap. 9 Rn. 29 f.; Schnell/Schwaab, 2021, S. 1095; Fries, 2021, § 9 Rn. 32: Jdf. an § 305c Abs. 1 BGB, da nicht marktüblich). Kann der Gläubiger durch den Smart Contract eigenmächtig auf das Vermögen des Schuldners zugreifen, so trägt der Schuldner im Falle des Nichtbestehens eines Anspruchs die Klagelast. Dadurch wird die ursprüngliche Situation umgekehrt. Die damit verbundene Umkehr des Klage- und Durchsetzungsrisikos ist regelmäßig unwirksam, wenn sie in AGB vereinbart wird (Riehm, 2019, Kap. 9 Rn. 30). Dies ist jedoch nicht in jedem Fall anzunehmen. Es sind Umstände denkbar in denen eine Selbstdurchsetzungsklausel angemessen sein. Ein klassisches Beispiel für regelmäßig angemessene Selbstdurchsetzungsklauseln außerhalb von Smart Contracts bilden bspw. Einzugsermächtigungen, die bereits jetzt regelmäßig Bestandteil von Verträgen sind (Riehm, 2019, Kap. 9 Rn. 31).

Ein weiterer typischer Anwendungsfall von Klauseln in Smart Contracts stellen **Preisanpassungsklauseln** dar. Bei Preisanpassungsklauseln wird im Falle des Eintritts von zuvor definierten Ereignissen der Preis angepasst. Gerade für Dauerschuldverhältnisse (z.B. Darlehensverträge) kann diese Konstellation relevant werden. Die Bedingungen, die zu einer

Preisanpassung führen können und ihre Folgen sind jedenfalls ausdrücklich zu beschreiben (BGH Urt. v. 09.05.2012 – XII ZR 79/10, NJW 2012, 2187 Rn. 21; Riehm, 2019, Kap. 9 Rn. 32). Auch hier gelten hinsichtlich der Beschreibung im Programmcode die obengenannten Grundsätze. Das Verhältnis von Leistung und Gegenleistung muss im Ergebnis jedenfalls aufrecht erhalten bleiben (BGH Urt. v. 15.11.2007 - III ZR 247/06, NJW 2008, 360 Rn. 10; Riehm, 2019, Kap. 9 Rn. 33).

### **Zwischenergebnis**

Liegen zwei wirksam abgegebene Willenserklärungen vor, so handelt es sich bei der unter Anwendung von Smart Contracts getroffenen Regelung um einen Vertrag im rechtlichen Sinne. Damit die abgegebenen Erklärungen rechtliche Wirkung entfalten können, muss die Programmierung des Smart Contracts auf die Anforderungen des geltenden Rechts abgestimmt werden. Das kann die Praxis vor nicht unerhebliche Herausforderungen stellen.

Als problematisch erweist sich die Beeinflussung des Inhalts des rechtlichen Vertrages durch den Programmcode. Darin liegt eine wesentliche Schwierigkeit beim Einsatz von Smart Contracts gegenüber einer breiten, technisch unkundigen Öffentlichkeit, wenn auf eine Erklärung in menschlicher Sprache verzichtet wird. Von einer solchen Öffentlichkeit kann regelmäßig kein Verständnis des Programmcodes erwartet werden. Diese Schwierigkeiten schlagen sich dann auch bei der Einbeziehung des Programmcodes als Vertragsinhalt in Gestalt von AGB und bei der Auslegung des Vertragsinhalts nieder. Im Ergebnis obliegt das Risiko des Verständnisses der Erklärungen aber der Partei, die nicht in der Lage ist, die auf dem Programmcode niedergelegte Willenserklärung zu verstehen und sich dennoch auf den Vertragsschluss unter Einsatz von Smart Contracts einlässt (Kaulartz/Heckmann, 2016, S. 621 f.).

Sind Rechtsgeschäfte an Formvorschriften gebunden, so können die digitalen Smart Contracts nur sehr eingeschränkt angewandt werden. Erklärungen unter Einbeziehung von Smart Contracts erfüllen nur die Anforderungen an die Textform.

Neben der bloßen Abgabe und dem Zugang von Willenserklärungen kann das bestehende Zivilrecht aber auch auf Anfechtungssituationen, die zu einer "Vernichtung" eines unter Einsatz von Smart Contracts geschlossenen Vertrages führen, umgehen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das Zivilrecht an den Vertragsschluss unter Einsatz von Smart Contracts strenge Bedingungen stellt. Im Ergebnis sprechen jedoch keine zivilrechtlich unüberwindbaren Hindernisse gegen den Einsatz von Smart Contracts im Rechtsverkehr. Auch Erklärungen, die unter Einsatz von Smart Contracts abgegeben werden, können als rechtswirksame Verträge qualifiziert werden.

### **4.2.2 Automatisierte Vertragsdurchführung unter Einsatz von Smart Contracts**

Eine weitere Konstellation des Einsatzes von Smart Contracts im Rechtsverkehr stellt die automatisierte Vertragsdurchführung durch Smart Contracts dar. Die automatisierte Vertragsdurchführung durch Smart Contracts ist vom Vertragsschluss unter Einsatz des Smart Contracts zu unterscheiden. Wird der Smart Contract lediglich zum Vertragsvollzug eingesetzt, so kann der Vertrag "außerhalb" der technischen Ebene wie ein klassischer Vertrag abgeschlossen worden sein, der zu einem späteren Zeitpunkt in Programmcode übertragen wird (Paulus/Matzke, 2018, S. 447 f.: "off-chain"; Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 4, 14). Ein Beispiel sind Leasing-Verträge für Kraftfahrzeuge (KfZ), bei denen ein Computerprogramm im Falle des Zahlungsverzugs verhindert, dass das geleaste KfZ weiterhin genutzt werden kann (Raskin, 2017, S. 330). Daneben können Smart Contracts auch eingesetzt werden, um gesetzliche Pflichten durchzusetzen (Bragelmann/Kaulartz, 2019, Kap. 1 Rn. 26).

Die Parteien sind im Rahmen der gem. Art. 2 Abs. 1 GG gewährleisteten **Inhaltsfreiheit** frei, die Bedingungen der Vertragsdurchführung eingeständig (im Rahmen der Gesetze) zu regeln (Möslein, 2019a, Kap. 8 Rn. 5, 25). Dies setzt zwar nach der Rechtsprechung des BGH zum automatisierten Schutz von Lizenzprogrammen eine (zumindest konkludente) vertragliche Abrede voraus (BGH Urt. v. 25.03.1987 - VIII ZR 43/86, NJW 1987, 2004; Urt. v. 15.09.1999 - I ZR 98/97, NJW-RR 2000, 393). Absolute Grenze der jeweiligen Ausgestaltung der Vertragsdurchführung im Vertrag stellt das **zwingende Recht** dar (vgl. beispielsweise § 276 Abs. 3, 134, 138 BGB; Riehm, 2019, Kap. 9 Rn. 8). Wesentliche Vorgaben machen insbesondere das AGB- und das Verbraucherschutzrecht (vgl. hierzu Spindler/Wöbbecking, 2019, Kap. 11).

Die jeweiligen Gestaltungsformen sind aber denkbar weit und im Einzelfall genauer zu untersuchen. Wie die konkrete Vertragsdurchführung dann im Einzelfall auszugestaltet ist, obliegt den Vertragsparteien. Es stellen sich aber auch hier allgemeine Probleme mit der Durchführung von Verträgen unter Zuhilfenahme von Smart Contracts, die vorliegend kurz skizziert werden sollen. Hierfür werden beispielhaft **typische Probleme** der Vertragsdurchführung mit Smart Contracts identifiziert und diskutiert.

### **Verbindung zur Realwelt (Oracles)**

Für zahlreiche Smart Contracts ist die Verbindung zur Realwelt entscheidend. Knüpfen sie nicht an rein digitale Sachverhalte an, so müssen durch sog. "Oracles" die Ereignisse in der Realwelt in den Smart Contract "importiert" und digital abgebildet werden. Ein Beispiel hierfür wäre die Bestätigung im Programm, dass eine bestimmte Ware abgeliefert wurde. Aufgrund der Folgen für die automatische Ausführung des Smart Contracts müssen diese Informationen richtig sein. Andernfalls können sie erhebliche Schäden verursachen. Eine Falscheingabe könnte darüber hinaus, als Betrug bewertet werden und strafrechtliche Folgen haben.

Obliegt die Eingabe zur Vertragsdurchführung einer der Vertragsparteien, so sind diese wohl durch eine **vertragliche Nebenpflicht** zu sorgfältigen (richtigen) Angaben verpflichtet. Die Kriterien für die Eingabe sollten bestenfalls bereits vorab geregelt sein. Erfolgt die Eingabe durch Dritte, so liegt mit diesem regelmäßig ein Vertrag, der ggf. eine Haftung bei falscher Eingabe auslösen kann.

### **Rückabwicklung von Verträgen, §§ 812 ff. BGB**

Wurde eine Vermögensverschiebung ohne Rechtsgrund vorgenommen, so folgt der Anspruch auf die Rückabwicklung der Vermögensverschiebung regelmäßig aus §§ 812 ff. BGB. Der Rückabwicklungsanspruch stellt einen eigenen Anspruch dar, der vom Anspruchsinhaber durchgesetzt werden muss. Aus rechtlicher Sicht können die Anspruchsvoraussetzungen, insbesondere des § 812 Abs. 1 BGB regelmäßig erfüllt sein (Weiss, 2022). Geschuldet wird die Rückgewähr der "Blockchain-Position", d.h. das, was der fehlerhaft Begünstigte durch die rechtsgrundlose Transaktion erlangt hat (regelmäßig der Eintrag in der Blockchain).

Diese Rückabwicklung von Vermögensverschiebungen durch Smart Contracts bereitet regelmäßig technische Probleme. Technisch spricht man in den Fällen der Rückabwicklung von Vermögensverschiebungen von sog. **Reserve Transactions**, d.h. Transaktionen, die "rückwärts" abgewickelt werden (Schrey/Thalhofer, 2017, S. 1436; Spindler/Wöbbecking, 2019, Kap. 11 Rn. 30). Die Rückgewähr der ursprünglichen Blockchain-Position scheidet aus, weil der Eintrag der Transaktion auf der Blockchain aufgrund ihrer Unveränderlichkeit nicht mehr gelöscht werden kann. Lediglich durch eine neue Transaktion kann die Blockchain-Position (Inhaberschaft an einem Token) wieder rückübertragen werden, indem der ursprüngliche Berechtigte wieder als Berechtigter eingetragen wird.

Das ist für die rechtliche Lage grundsätzlich unschädlich. Eine Transaktion in der Realwelt könnte auch ohne eine entsprechende Abbildung in der Blockchain rückabgewickelt werden (Weiss, 2022, Rn. 29). Anders jedoch stellt sich die Lage dar, wenn die Transaktion auch in der Blockchain abgebildet sein soll (z.B. bei der Übertragung von Kryptotoken) - sog. konstitutive Blockchains. Der jeweilige Bestand und die Zuordnung des Tokens sind an die Dokumentation der Transaktion auf der Blockchain geknüpft. Nur wer als Inhaber des Tokens (z.B. eines Bitcoins) auf der Blockchain vermerkt ist, wird als tatsächlicher Inhaber angesehen (vgl. Weiss, 2022, Rn. 4). In diesen Konstellationen müssen die Verfügungen und Transaktionen so lange rückabgewickelt werden, bis die eigentlichen Rechtsverhältnisse wiederhergestellt werden. Die ursprüngliche, unwirksame Transaktion bleibt dann zwar als Eintrag bestehen, wird aber wirtschaftlich wieder rückgängig gemacht. Ist der unberechtigt Begünstigte nicht mehr Inhaberin eines hinreichenden Guthabens, so hat sie gem. § 818 Abs. 2 BGB Wertersatz zu leisten. Sie schuldet den Wert der übertragenen Blockchain-Position in Geld (Weiss, 2022, Rn. 35).

Die Schwierigkeit, die sich aus Reverse Transactions ergibt, besteht vor allen Dingen darin, dass sie die **Mitwirkung** des durch die Vermögensverfügung fehlerhaft Begünstigten voraussetzt, indem dieser durch die Eingabe seines Private Keys die Reverse Transaction anstößt (Spindler/Wöbbeking, 2019, Kap. 11 Rn. 30). Das bereitet insbesondere bei öffentlichen Blockchain-Anwendungen Schwierigkeiten, in denen das jeweilige Gegenüber dem zur Rückabwicklung Berechtigten nicht bekannt ist (Spindler/Wöbbeking, 2019, Kap. 11 Rn. 29).

An der praktischen Wirksamkeit dieser Abwicklung bestehen daher erhebliche Zweifel (Kaulartz, 2021, § 5 Rn. 54), da im Gegensatz zur Herausgabevollstreckung "off-chain" die "on-chain" Rückabwicklung eine vertretbare Handlung, § 888 Abs. 1 ZPO des unberechtigten Inhabers erfordert (Spindler/Wöbbeking, 2019, Kap. 11 Rn. 30). Durch die Pseudonymisierung der Vertragspartner ist die Wirksamkeit der Durchsetzung von Ansprüchen erheblich gehemmt, da die Parteien auf der Ebene der Blockchain regelmäßig ihren Vertragspartner nicht persönlich kennen. Für die rechtliche Durchsetzung der Ansprüche ist jedoch der Klurname des Betroffenen erforderlich, um die Ansprüche vor Gericht durchsetzen zu können (§ 253 Abs. 2 Nr. 1 ZPO; vgl. nur BGH NJW 1988, 2114).

Verweigert das Gegenüber die Reverse Transaction, so käme lediglich ein sog. Hard Fork in Betracht, durch den der Zustand vor der Transaktion wiederhergestellt würde. Diese Lösung ist jedoch gerade bei einer sog. "permissionless" Blockchain wenig plausibel, da sie auch andere, wirksame Transaktionen zurücksetzen würde und alle Nodes der Hard Fork zustimmen müssten. Andere technische Lösungen scheinen ebenfalls wenig hilfreich: Eine Rückabwicklung ohne Mitwirkung des unberechtigt Begünstigten widerspricht der grundsätzlichen Gestaltung der Blockchain, da dort lediglich Transaktionen verifiziert werden sollen (Weiss, 2022, Rn. 16 f.).

Des Weiteren wäre es technisch denkbar, dass die Transaktion für eine bestimmte Frist gesperrt wird oder die Verifikation von einem Ereignis wie beispielsweise eine externe Prüfung abhängig gemacht wird. Diese Lösungsansätze erscheinen jedoch wenig zielführend, da beispielsweise die gesetzlichen Ausschlussfristen für Anfechtungen 10 Jahre betragen (§§ 121 Abs. 2 BGB, 123 Abs. 2 BGB). Eine solche Verzögerung wäre jedoch offensichtlich praktisch nicht akzeptabel.

Gleiches gilt für die externe Überprüfung. Eine solche Überprüfung würde sowohl zu Verzögerungen als auch zu weiteren Transaktionskosten für die Überprüfung führen. Je nach Umfang der entstehenden Kosten würde eine Transaktion dadurch wirtschaftlich unattraktiv.

Eine technische Lösung ist daher nicht möglich. Die Betroffene ist bei der permissionless Blockchain auf die rechtliche Durchsetzung im Wege der Vollstreckung einer unvertretbaren Handlung, § 888 Abs. 1 ZPO zurückgeworfen. Um diese Durchsetzung zu sichern kann der jeweilige Nutzer der Blockchain sicherstellen, dass er nur mit Vertragspartner kontrahiert, deren Identität ihm bekannt ist, sodass die gerichtliche Durchsetzung eines Rückübertragungsanspruchs gesichert wäre.

Im Falle von **neuen Blockchain-Anwendungen**, die beispielsweise spezifisch für Anwendungen im Umweltschutz neu programmiert werden, können diese Unsicherheiten aber abgemildert werden. Sie sind von der Nutzung bestehender Blockchain-Anwendungen zu trennen. Handelt es sich um eine permissioned Blockchain, so wird der Nutzung regelmäßig ein Vertrag zugrunde liegen (Nutzungsvertrag), der von den bei der Nutzung der Blockchain-Anwendung geschlossenen Verträgen zu trennen ist. Durch diese Trennung wären der Nutzungsvertrag nicht von einer Anfechtung des eigentlichen Transaktionsvertrages erfasst. Der Vorteil einer permissioned Blockchain liegt darin, dass die Akteure im Netzwerk zumindest dem Administrator bekannt sind. Durch Klauseln im Nutzungsvertrag können die Parteien verpflichtet werden im Falle der Rückabwicklung von fehlerhaften Transaktionen einem Streitschlichtungsmechanismus zuzustimmen, bei dem beispielsweise das Guthaben des unberechtigt Begünstigten in Höhe der umstrittenen Summe eingefroren und damit für künftige Transaktionen gesperrt würde. Damit wäre noch nicht das Risiko einer zwischenzeitlichen Verfügung vor Auslösung des Streitschlichtungsmechanismus begegnet, aber das Risiko nachträglicher Verfügungen abgemildert. Außerdem kann in diesen Fällen sichergestellt werden, dass die Parteien Kenntnis von der Identität des Vertragspartners erlangen können, um ihre Ansprüche gerichtlich geltend machen zu können. Die konkrete Ausgestaltung ist im Einzelfall zu klären.

Zu beachten ist, dass es sich bei den Unsicherheiten, die mit einer Rückabwicklung von fehlerhaften Verträgen verbunden sind, **nicht um ein Blockchain-spezifisches Problem** handelt. Die Unsicherheit, die mit der Rückabwicklung von fehlerhaften Verträgen verbunden ist, ist dem Recht bekannt und kann auch bei analogen Sachverhalten nicht gänzlich vermieden werden (Weiss, 2022, Rn. 19). Die Blockchain birgt gegenüber der klassischen Anfechtungssituation gar den Vorteil, dass durch das lückenlose Verfügungsprotokoll die nachfolgenden Verfügungen nachvollzogen werden können und die Rückübertragung dadurch erleichtert wird. Mit der gerichtlichen Durchsetzung der Rückgewähransprüche und deren Durchsetzung im Wege der Vollstreckung, ist der Betroffene in hinreichendem Maße abgesichert.

### **Zulässigkeit des Selbstvollzugs**

Wie bereits dargelegt enthalten zahlreiche Smart Contracts Passagen, die einen Selbstvollzug der rechtlichen Ergebnisse des Vertrages vorsehen. Die Zulässigkeit dieses Selbstvollzugs wirft auch außerhalb der Vereinbarung von Selbstvollzugsklauseln in AGB rechtliche Fragen auf.

Der rechtliche Regelfall der Durchsetzung von vertraglichen Verpflichtungen gegen den Willen des Schuldners stellt der Rückgriff auf staatliche Streitschlichtungsmechanismen dar. Vereinbaren die Parteien jedoch einen Selbstvollzug durch das Computerprogramm des Smart Contracts, so führt dies zu einer Abkehr von den staatlichen Durchsetzungsmechanismen hin zu einer Art (vereinbarten) Selbstjustiz. Einen derartigen Selbstvollzug erlaubt das Recht nur unter strengen Bedingungen (vgl. §§ 229 BGB, 858 Abs. 1, 2, 861 BGB; aus der Literatur Fries, 2019, S. 902; Siedler, 2021, § 7 Rn. 14).

Der rechtliche Regelfall bildet dabei der Selbstvollzug **gegen** den Willen des Schuldners. Beim Smart Contract hat der Schuldner aber vorab in den **Selbstvollzug eingewilligt**. Zu überprüfen

bleibt daher welche Wirkungen von einer solchen vertraglichen Vorab-Einwilligung in den Selbstvollzug ausgehen. Wie bereits dargelegt, stellt der Selbstvollzug von Ansprüchen keine Neuerung durch Smart Contracts dar. Durch die Vereinbarung von Einziehungsermächtigungen waren solche Konstellationen dem Recht auch vor der Verbreitung von Smart Contracts durchaus bekannt.

Problematisch bei einem vereinbarten Selbstvollzug ist die **Umkehr der Klage-** und meist auch der **Beweislast** zulasten des Schuldners. Das rechtliche Ergebnis des Vertrages wird daher unabhängig von der tatsächlichen Mitwirkung des Schuldners durch technische Maßnahmen eigenwillig herbeigeführt. Stimmt die dadurch erreichte tatsächliche Lage (z.B. aufgrund einer Unwirksamkeit des Vertrages) nicht mit der rechtlichen Lage überein, so muss der Schuldner auf Rückabwicklung der Vermögensänderung klagen (Riehm, 2019, Kap. 9 Rn. 4).

Die Vereinbarung einer solchen Selbstdurchsetzungsklausel in AGB ist regelmäßig unwirksam, kann aber unter Umständen individualvertraglich vereinbart werden (Riehm, 2019, Kap. 9 Rn. 30). Die vertragliche Inhaltsfreiheit erlaubt auch die Unterwerfung unter die private Selbstdurchsetzung, wobei jedoch die Grenzen des Gesetzes zu beachten sind (Möslein, 2019, S. 282).

Dort, wo die Software mit einer Sache verbunden wird, kann ein Selbstvollzug **verbotene Eigenmacht**, §§ 858 Abs. 1 BGB, 859 BGB darstellen (Fries, 2019, S. 902; Riehm, 2019a, S. 96 f.; Fries, 2021, § 9 Rn. 33). Verbotene Eigenmacht liegt vor, wenn ein Dritter dem Besitzer ohne dessen Willen der Besitz entzogen wird oder der Besitzer im Besitz gestört wird und diese Entziehung oder Störung nicht durch das Gesetz gestattet ist. Für die Bewertung, ob die Besitzentziehung oder -störung gegen den Willen der Besitzerin erfolgt, kommt es lediglich auf den natürlichen Willen im Augenblick der Wegnahme an. Vorherige vertragliche Zustimmungen zur Besitzentziehung oder -störung entfalten keine besitzrechtliche Wirkung (Schäfer, 2023, § 858 Rn. 15 m. w. N.). Die Fortwirkung der vertraglichen Zustimmung wird lediglich vermutet, kann aber auch durch einen konkludent empfangsbedürftigen Widerruf aufgehoben werden (Schäfer, 2023, § 858 Rn. 15). Liegt eine vertragliche Vorab-Zustimmung zum Selbstvollzug vor, so führt dies noch nicht in jedem Fall zur Zulässigkeit dieses Selbstvollzugs.

Im Falle von **immateriellen Transaktionen**, die sich nicht auf Sachen beziehen, gelten diese Einschränkungen bereits dem Wortlaut nach nicht (Möslein, 2019, S. 283). Dies stellt auch gerade den Unterschied zur klassischen Einziehungsermächtigung dar.

§ 229 BGB scheint in den Fällen des vereinbarten Selbstvollzugs auch nicht in jedem Fall weiterzuhelfen. Voraussetzung für die Zulässigkeit der Selbsthilfe ist, dass obrigkeitliche Hilfe nicht erlangt werden kann und der Anspruch ohne sofortiges Eingreifen gefährdet wäre. Das dürfte aber auch in den Fällen der Smart Contracts nur im Einzelfall gegeben und nicht flächendeckend anzunehmen sein. Vertragliche Erweiterungen des Rechts auf Selbsthilfe sind wirkungslos (Grothe, 2021, § 229 Rn. 1 m. w. N.).

Die Fälle eines zulässigen Selbstvollzugs sind daher auch bei einer individualvertraglichen Vereinbarung begrenzt. Sie sind im Einzelfall genau zu prüfen.

### 4.2.3 Zusammenfassung Zivilrecht

Im Ergebnis zeigt sich, dass sich mit dem vermehrten Aufkommen von Smart Contracts sowohl zur Vertragsbegründung als auch zur Vertragsdurchführung zivilrechtliche Fragen stellen, die in der Gesamtheit jedoch **durch die bestehenden Rechtsnormen gelöst werden** können (So auch Heckelmann, 2018, S. 504; Paulus/Matzke, 2018, S. 432 ff.; Paulus, 2020, S. 107; Fries, 2021, § 9 Rn. 40). Den zivilrechtlichen Herausforderungen durch Blockchain-basierte Smart Contracts kann auf der Ebene der Vertragsgestaltung im Rahmen der grundrechtlich geschützten Vertragsfreiheit Rechnung getragen werden. Darüber hinaus gehende Fragen wie die zivilrechtliche Behandlung von Token und Kryptowerten wurden vorliegend nicht untersucht (vgl. zu einer Anpassung des Zivilrechts de lege ferenda: Omlor, 2024).

Allerdings bleibt auch festzuhalten, dass Smart Contracts kein "Allheilmittel" darstellen, das auf jede Vertragssituation Anwendung finden kann. Ihr konkreter Einsatz muss genau überlegt sein und die Vorteile die jeweiligen Nachteile überwiegen. **Schwierigkeiten** bereitet die Implementierung von rechtlichen Regelungen in Smart Contracts regelmäßig dann, wenn sie Auslegungs- und Ermessensspielraum eröffnen, wie bspw. § 313 BGB (Kaulartz, 2021, § 5 Rn. 52). Computerprogramme sind derzeit noch nicht in der Lage diese Auslegungsspielräume eigenständig auszufüllen.

Neben dem Programmcode empfiehlt sich daher regelmäßig auch der Abschluss eines Vertrags in normaler Sprache, der auf den Smart Contract als Programm Bezug nimmt und dazu beitragen kann, die Komplexität der Rechtsstreitigkeiten zu verringern (Riehm, 2019, Kap. 9 Rn. 6). Wie gezeigt wurde, können zwar auch die Regelungen des Programmcodes zur Auslegung der Willenserklärungen herangezogen werden, sie allein sind nicht immer ausreichend. Im Gegensatz zu Sprache, die interpretationsoffen ist und durch Auslegung an Änderungen der Anwendungsumgebung angepasst werden kann, muss Programmcode eindeutig (deterministisch) sein damit Computer ihn ausführen können. Gepaart mit der Blockchain-basierten Unveränderbarkeit können Smart Contracts nur durch eine Neuprogrammierung angepasst werden. Dies erfordert jedoch weitere Verhandlungen zwischen den Parteien und nicht selten aus rechtlicher Sicht den Abschluss eines neuen Vertrages zur Änderung des bestehenden Programms. Bei Verweigerung einer der Vertragsparteien kann dies zu Schwierigkeiten führen. Diese Inflexibilität des Programmcodes kann zu Konflikten mit neuen Realitäten führen, die zuvor durch Auslegung gelöst werden konnten.

Außerdem sind Lösungen in dem Smart Contracts zu implementieren, die eine Reaktion auf das Auseinanderfallen von rechtlicher und programmierter Lage ermöglichen (z.B.: **Reverse Transactions**, vgl. auch Riehm, 2019, Kap. 9 Rn. 4). In diesen Fällen müssen die Dispositionen, die die Software trifft, auf dem Rechtsweg korrigiert werden (Fries, 2021, § 9 Rn. 43). Diese Korrekturen auf dem Rechtsweg müssen gleichzeitig auch auf der Blockchain nachvollzogen werden, um ein Auseinanderfallen zu verhindern, die andernfalls die Durchsetzung von Ansprüchen gefährden kann (z.B. durch Weiterübertragungen).

Damit ein Smart Contract nicht in den Konflikt mit dem Recht tritt, muss er sich an der rechtlichen Lage orientieren, nicht das Recht an der Software (Fries, 2019, S. 902). Das ist insbesondere bei Verbraucherschützenden und anderen zwingenden Vorschriften des BGB zu beachten. Im Ergebnis zeigt sich, dass die Einordnung von Smart Contracts als technische Lösung dazu führt, dass im konkreten Einzelfall eine sorgfältige Subsumtion des Sachverhalts unter die Rechtsnormen, die diesen Sachverhalt regeln, zu erfolgen hat. Eines allgemeinen Smart-Contract-Rechts bedarf es jedoch nicht, um eine rechtssichere Gestaltung zu ermöglichen. Das bestehende Recht ist in der Lage den Rechtsfragen im Zusammenhang mit der neuen Technologie zu begegnen.

### 4.3 Datenschutzrechtliche Herausforderungen

Im Zusammenhang mit Blockchain-basierten Smart Contracts stellen sich darüber hinaus auch zahlreiche datenschutzrechtliche Herausforderungen. Zentrale Normen des Datenschutzrechts sind die europäische **Datenschutz-Grundverordnung (DS-GVO)**<sup>59</sup>, die am 25.05.2016 in Kraft getreten ist und am 25.05.2018 Geltung erlangt hat und auf nationaler Ebene das **Bundesdatenschutzgesetz (BDSG)**<sup>60</sup> und die jeweiligen Landesdatenschutzgesetze der Bundesländer. Daneben bestehen zahlreiche bereichsspezifische datenschutzrechtliche Vorgaben (Paal/Pauly, 2021, Vorbemerkung Art. 1 Rn. 3).

Vorliegend sollen in erster Linie die Vorgaben der DS-GVO Beachtung finden, da aufgrund des Anwendungsvorrangs unionsrechtlicher Normen und der gem. Art. 288 Abs. 2 AEUV bestehenden unmittelbaren Anwendbarkeit von Verordnungen die DS-GVO vorrangig gegenüber nationalen Regelungen zu berücksichtigen ist (vgl. auch § 1 Abs. 5 BDSG, zum Verhältnis der Rechtsnormen untereinander: Paal/Pauly, 2021, Vorbemerkung Art. 1 Rn. 3). Bereichsspezifische Vorschriften werden **nicht** berücksichtigt.

#### Anwendungsbereich der DS-GVO

Damit Blockchain-Anwendungen an datenschutzrechtlichen Vorgaben zu messen sind, müsste der Anwendungsbereich der DS-GVO eröffnet sein. Hierzu ist zwischen dem sachlichen, dem personellen und dem territorialen Anwendungsbereich zu unterscheiden. Sachlich ist die DS-GVO gem. Art. 2 Abs. 1, Art. 3 Abs. 1 DS-GVO anwendbar, wenn die Verarbeitung von personenbezogenen Daten gegeben ist und keine Ausschlussgründe (Art. 2 Abs. 2 DS-GVO) erfüllt sind. Personell werden nur der Verantwortliche (Art. 4 Nr. 7 DS-GVO) und der Auftragsverarbeiter (Art. 4 Nr. 8 DS-GVO) datenschutzrechtlich verpflichtet. Die Prüfung der Eröffnung des Anwendungsbereichs und der datenschutzkonformen Ausgestaltung von bestimmten Systemen muss unter Berücksichtigung des konkreten Einzelfalls erfolgen. Vorliegend können nur abstrakte Erwägungen diskutiert werden.

Damit der **sachliche Anwendungsbereich** eröffnet sein kann, ist eine Verarbeitung von personenbezogenen Daten erforderlich. Der **Begriff der Datenverarbeitung** wird in Art. 4 Nr. 2 DS-GVO definiert. Unter einer Verarbeitung ist *„jeder mit oder ohne Hilfe automatisierter Verfahren ausgeführten Vorgang oder jede solche Vorgangsreihe im Zusammenhang mit personenbezogenen Daten wie das Erheben, das Erfassen, die Organisation, das Ordnen, die Speicherung, die Anpassung oder Veränderung, das Auslesen, das Abfragen, die Verwendung, die Offenlegung durch Übermittlung, Verbreitung oder eine andere Form der Bereitstellung, den Abgleich oder die Verknüpfung, die Einschränkung, das Löschen oder die Vernichtung“* (Art. 4 Nr. 2 DS-GVO) zu verstehen.

Eine solche Verarbeitung dürfte bei einer permissionless Blockchain bereits mit der automatischen Erzeugung des Private Keys und des Public Keys vorliegen (Schmid, 2021, Rn. 10 ff.). Im Falle einer permissioned Blockchain liegt eine Datenverarbeitung jedenfalls mit der Registrierung der Teilnehmer beim Administrator vor (vgl. Krupar/Strassemeyer, 2018, S. 747; Janicki/Saive, 2019, S. 252; Steinrötter, 2021, S. 378).

Eine weitere Voraussetzung stellt das Vorliegen von **personenbezogenen Daten** gem. Art. 4 Nr. 1 DS-GVO dar. Um personenbezogene Daten handelt es sich bei allen *„Informationen, die sich auf eine identifizierte oder identifizierbare natürliche Person [...] beziehen; als identifizierbar wird eine natürliche Person angesehen, die direkt oder indirekt, insbesondere mittels Zuordnung zu einer*

59 Verordnung des Parlaments und des Rates v. 27.04.2016, VO (EU) 2016/679.

60 Bundesdatenschutzgesetz vom 30.06.2017 (BGBl. I S. 2097), in Kraft getreten am 25.05.2018, zuletzt geändert durch Gesetz v. 23.06.2021 (BGBl. I S. 1858, über. 2022 S. 1045).

*Kennung [...] identifiziert werden kann*“. Bei anonymisierten Daten handelt es nicht um personenbezogene Daten, während pseudonymisierte Daten aufgrund der Möglichkeit einer Re-Identifikation als personenbezogene Daten in den Anwendungsbereich der DS-GVO fallen.

Im Hinblick auf die Abgrenzung, ob ein Datum personenbezogen oder nicht-personenbezogen ist, stellen sich regelmäßig anspruchsvolle Abgrenzungsfragen. Der Personenbezug ist weit zu verstehen (EuGH Urt. v. 19.10.2016 - C-582/14 - (Breyer) = MMR 2016, 842 Rn. 45 f., 49; vgl. außerdem bspw. Klabunde, 2018, Rn. 7; Schild, 2023, Rn. 21a). Neben dem Personenbezug muss außerdem die natürliche Person identifiziert oder identifizierbar sein. Dabei ist umstritten, ob die Identifizierbarkeit relativ, d.h. im Hinblick auf die Möglichkeiten des jeweiligen Verantwortlichen zu bestimmen ist, oder absolut, d.h. im Hinblick auf die Identifizierungsmöglichkeiten eines beliebigen Dritten, zu verstehen ist (Schmid, 2021, Rn. 19; Gola, 2022, Rn. 19 ff. m. w. N.). In seiner Entscheidung v. 16.10.2016 hat der EuGH differenzierend entschieden, dass im Ausgangspunkt zwar die relativen Möglichkeiten des konkret Verantwortlichen entscheidend sind, zusätzlich aber auch die Möglichkeiten zur Identifizierung berücksichtigt werden müssen, die nicht beim Verantwortlichen vorliegen, die aber mit rechtlichen Mitteln und verhältnismäßigem Aufwand erlangen könnte (EuGH Urt. v. 19.10.2016 - C-582/14 - (Breyer) = MMR 2016, 842 Rn. 45 f., 49; vgl. auch Krupar/Strassemeyer, 2018, S. 748; Bechtolf/Vogt, 2018, S. 68). Entscheidend sind daher die allgemeinen Möglichkeiten der Identifikation, wobei jedoch nur solche Identifizierungsmöglichkeiten berücksichtigt werden, die im Einzelfall rechtlich zulässig und praktisch verhältnismäßig sind (Bechtolf/Vogt, 2018, S. 68; Janicki/Saive, 2019, S. 252; Steinrötter, 2021, S. 379). Hierfür spricht nach der Rechtslage unter der DS-GVO auch der EWG 26, S. 3 (Janicki/Saive, 2019, S. 252; Steinrötter, 2021, S. 379).

Bei **permissionless Blockchain** werden regelmäßig pseudonymisierte, aber nicht anonymisierte Daten verarbeitet (Krupar/Strassemeyer, 2018, S. 748; Böhme/Pesch, 2017, S. 478; Pesch/Böhme, 2017, S. 95; Bechtolf/Vogt, 2018, S. 68). Dies gilt beispielsweise für Public Keys, die regelmäßig in Verbindung mit weiteren Daten Rückschlüsse auf die Person des Inhabers zulassen (Martini/Weinzierl, 2017, S. 1253; Pesch/Böhme, 2017, S. 95; Bechtolf/Vogt, 2018, S. 69; Finck, 2018, S. 24 f.; Janicki/Saive, 2019, S. 252; aA Schrey/Thalhofer, 2017, S. 1433) oder Daten, die im Register gespeichert werden (Finck, 2018, S. 22). Im Ergebnis liegen bei permissionless Blockchains somit regelmäßig personenbezogene Daten vor, sodass der Anwendungsbereich der DS-GVO eröffnet ist (Vorschläge, um eine Anonymisierung zu erreichen diskutiert Finck, 2018, S. 23 ff.).

Dieses Ergebnis ist auch auf **permissioned Blockchains** übertragbar. Hier sind dem Administrator die einzelnen Akteure, die sich zuvor bei ihm registrieren mussten, bekannt (Martini/Weinzierl, 2017, S. 1253; Schrey/Thalhofer, 2017, S. 1433; Janicki/Saive, 2019, S. 252; Steinrötter, 2021, S. 379). Jedenfalls für diesen Administrator sind die dahinterstehenden Personen daher ohne weiteres identifizierbar. Es liegen daher auch hier personenbezogene Daten vor. Im Ergebnis ist der **sachliche Anwendungsbereich** der DS-GVO bei Blockchain daher regelmäßig **eröffnet**.

Ein komplexeres Bild ergibt sich hinsichtlich des **personellen Anwendungsbereichs**. Durch den personellen Anwendungsbereich wird bestimmt für welche Personen durch die Rechtsnormen verpflichtet werden. Aufgrund der dezentralen Struktur der Blockchain ist die Bestimmung des Verantwortlichen nicht ohne Probleme. Verpflichtet sind die Verantwortlichen und Auftragsverarbeiter. Es kommt auch eine gemeinsame Verantwortlichkeit gem. Art. 26 DS-GVO in Betracht. Als potenziell verpflichtet kommen die unterschiedlichen Akteure auf der Blockchain in Betracht, sofern sie fremde personenbezogene Daten verarbeiten (Steinrötter, 2021, S. 381; Wendehorst/Gritsch, 2023, Rn. 15 ff.). Die möglichen Verantwortlichen sind die

Beteiligten an einer Transaktion (Senderin und Empfängerin), die Full-Nodes (Steinrötter, 2021, S. 381). Unter Full-Nodes sind die Stellen zu verstehen, die “Transaktionen und Blöcke verifizieren” ohne selbst Blöcke zu generieren (Steinrötter, 2021, S. 376).

Bei einer **permissionless Blockchain** ist die Verantwortlichkeit der einzelnen Akteure umstritten. Während teilweise die Zuordnung einer Verantwortlichkeit insgesamt abgelehnt wird (Böhme/Pesch, 2017, S. 478 f.; Quiel, 2018, S. 569 f.), treten andere Stimmen in der Literatur pauschal für eine Qualifikation aller Teilnehmenden als Verantwortliche ein (bspw. Schrey/Thalhofer, 2017, S. 1433 f.; Bechtolf/Vogt, 2018, S. 69; Finck, 2018, 26). Zielführender erscheint jedoch eine differenzierende Betrachtung der einzelnen Akteure (Martini/Weinzierl, 2017, S. 1253 f.; Schmid, 2021, Rn. 46 ff. Steinrötter, 2021, S. 381 f. m. w. N.): Danach sind die Beteiligten als Initiatoren einer Einzeltransaktion Verantwortliche (Krupar/Strassemeyer, 2018, S. 479), während die Miner mangels Einflusses auf den Zweck und Mittel der Datenverarbeitung nur als Auftragsverarbeiter einzustufen sind (Krupar/Strassemeyer, 2018, S. 479 f.; Martini/Weinzierl, 2017, S. 1253; Janicki/Saive, 2019, S. 253 f., 255; Steinrötter, 2021, S. 381).

Löst man die Frage der Verantwortlichkeit von den einzelnen Transaktionen, so ist die Zuordnung der Verantwortlichkeit bei permissionless Blockchain nicht mehr möglich. Der Programmierer oder der Initiator der Blockchain sind mangels Einflusses auf die konkrete Verarbeitung nicht Verantwortliche iSd DS-GVO (Martini/Weinzierl, 2017, S. 1253). Eine Verantwortlichkeit für das Gesamtsystem besteht für keinen Akteur (Steinrötter, 2021, S. 383).

Weitgehend unumstritten hingegen ist die Einordnung bei einer **permissioned Blockchain**. „Verantwortlicher“ iSd Art. 4 Nr. 7 DS-GVO ist die *“natürliche oder juristische Person, Behörde, Einrichtung oder andere Stelle, die allein oder gemeinsam mit anderen über die Zwecke und Mittel der Verarbeitung von personenbezogenen Daten entscheidet”*. Mit dem Administrator besteht eine zentrale Stelle, die vom Datenschutzrecht als Verantwortlicher erfasst wird (Martini/Weinzierl, 2017, S. 1254; Finck, 2018, S. 26; Quiel, 2018, S. 570; Janicke/Saive, 2019, S. 255). Er bestimmt durch seine zentrale Stellung Mittel und Zweck der Datenverarbeitung und kann die jeweilige Programmgestaltung entscheidend bestimmen. Neben dem Administrator seien aber auch die einzelnen Beteiligten einer Transaktion als Verantwortliche im Hinblick auf Einzeltransaktionen anzusehen (Schmid, 2021, Rn. 38; Steinrötter, 2021, S. 382; zur Einschätzung als Auftragsverarbeiter: Janicke/Saive, 2019, S. 255). Die Miner und Full-Nodes seien hingegen Auftragsverarbeiter, da sie nicht selbst über den jeweiligen Zweck und die Mittel der Transaktion bestimmen können (Martini/Weinzierl, 2017, S. 1254; Janicke/Saive, 2019, S. 255 f.).

Eine **gemeinsame Verantwortlichkeit** scheidet in den Fällen mehrerer Verantwortlicher mangels gemeinsamer Vereinbarung über den Zweck und die Mittel der Verarbeitung aus (Finck, 2018, S. 26; Schmid, 2021, Rn. 48; Steinrötter, 2021, S. 382; aA wohl Quiel, 2018, S. 569 f. m. w. N.).

Nicht zuletzt ist im Hinblick auf die globale Verbreitung und Internationalität der Blockchain-Anwendungen der **territorialen Anwendbarkeit** der DS-GVO genauere Betrachtung zu schenken. In einem P2P-Netzwerk sind häufig nicht nur Akteure aus der europäischen Union verbunden, sondern Akteure aus aller Welt. Dies könnte vor dem Hintergrund des völkerrechtlichen Territorialitätsprinzip Schwierigkeiten bereiten. Anknüpfungspunkt für die Bestimmung des territorialen Anwendungsbereichs ist Art. 3 DS-GVO.

Die DS-GVO knüpft gem. Art. 3 Abs. 1 nicht an den Ort der Datenverarbeitung an – dessen Bestimmung im digitalen Umfeld auch schwierig erscheint – sondern an den Ort der Niederlassung des Verantwortlichen oder eines Auftragsverarbeiters. Des Weiteren bestimmt sich die Anwendbarkeit nach dem Aufenthaltsort des Betroffenen in der Europäischen Union,

unabhängig von der Niederlassung des Verantwortlichen bzw. des Auftragsverarbeiters (Art. 3 Abs. 2 DS-GVO), sofern die Verarbeitung in Zusammenhang steht mit einer Warenlieferung oder Dienstleistungserbringung an eine betroffene Person in der EU oder dem Beobachten eines Verhaltens eines Betroffenen, soweit dieses Verhalten in der Union erfolgt (sog. Marktortprinzip, vgl. Oster, 2021, S. 284 f.). Bei permissionless Blockchain scheint die Anwendbarkeit daher in den meisten Fällen gegeben, da regelmäßig ein Bezug zur EU bestehen wird. Bei permissioned Blockchain kommt hingegen ein Ausschluss dann in Betracht, wenn der Zugangsbereich für Betroffene mit Unionsbezug ausgeschlossen würde (Steinrötter, 2021, S. 384).

Als **Zwischenergebnis** kann festgehalten werden, dass der Anwendungsbereich der DS-GVO bei Blockchain-Anwendungen regelmäßig eröffnet ist. Etwas anderes gilt nur dort, wo ausnahmsweise rein sachbezogene Daten, wie Maschinendaten, verarbeitet werden (vgl. Pesch, 2019, S. 19 f.) und dadurch ausgeschlossen ist, dass durch eine Re-Identifikation ein Personenbezug hergestellt werden kann. Bei ehemals personenbezogenen oder personenbeziehbaren Daten ist das nur in wenigen Fällen zweifelsfrei auszuschließen, da die dynamischen Entwicklungen bei den technischen Möglichkeiten der Re-Identifikation zu beachten sind (Roßnagel, 2018, S. 246 f.). In Zweifelfällen sollte daher von der Eröffnung des Anwendungsbereichs der DS-GVO ausgegangen werden.

#### **Grundsätze der Rechtmäßigkeit der Datenverarbeitung**

Die Verarbeitung von personenbezogenen Daten ist grundsätzlich verboten, Art. 6 Abs. 1 DS-GVO. Damit die Datenverarbeitung zulässig wird, müsste eine der in Art. 6 Abs. 1 DS-GVO abschließend genannten Legitimationsgründe die Datenverarbeitung legitimieren. Für Blockchain-Anwendungen kommt die Zulässigkeit der Datenverarbeitung aufgrund einer Einwilligung (lit. a), zur Erfüllung eines Vertrages oder vorvertraglicher Maßnahmen (lit. b) oder zur Wahrnehmung eines berechtigten Interesses des Verantwortlichen oder eines Dritten (lit. f) in Betracht. Ist der Verantwortliche eine Behörde, so ist die legitime Verarbeitung im Übrigen aufgrund von Art. 6 Abs. 1 lit. e DS-GVO denkbar.

Die **Einwilligung** als Legitimationsgrundlage setzt gem. Art. 4 Nr. 11, Art. 7 DS-GVO voraus, dass die betroffene Person freiwillig und in informierter Weise, unmissverständlich in Form einer Erklärung oder sonstigen eindeutigen Handlung ihren Willen bekundet hat, dass sie mit der Verarbeitung der sie betreffenden personenbezogenen Daten einverstanden ist. Die Einwilligung kann nach Art. 7 Abs. 3 DS-GVO jederzeit widerrufen werden. Für eine Einwilligung kommen verschiedene Anknüpfungspunkte in Betracht. So könnten die Parteien einer Transaktion in die Verarbeitung ihrer personenbezogenen Daten durch den jeweilig anderen einwilligen. Es erscheint jedoch fragwürdig, ob die genannten Informationspflichten in dem Maße erfüllt sind, dass von einer informierten Entscheidung gesprochen werden kann (Zweifel bei Quiel, 2018, S. 571; Steinrötter, 2021, S. 384). Insbesondere wird es wohl regelmäßig an der Klarheit fehlen, wem die Einwilligung erteilt wurde (Schrey/Thalhofer, 2017, S. 1434). Das soll aber unter anderem gerade Voraussetzung für eine wirksame Einwilligung nach EWG 42, S. 4 sein.

Des Weiteren wäre die Einwilligung regelmäßig nur untaugliche Grundlage für die Verarbeitung der Daten auf einer Blockchain: Einwilligungen können gem. Art. 7 Abs. 3 DS-GVO jederzeit widerrufen werden (Quiel, 2018, S. 571). Die Blockchain speichert die Daten jedoch dauerhaft; sie sind grundsätzlich nicht löscherbar und unterliegen der ständigen Weiterverarbeitung (Steinrötter, 2021, S. 384). Der Beitritt in das P2P-Netzwerk und die Beteiligung an Blockchain-Anwendungen scheidet aus den genannten Gründen ebenso aus, um eine wirksame Einwilligung als Legitimationsgrundlage zu begründen.

Demgegenüber erscheint zumindest bei **permissioned Blockchain** eine Einwilligung gegenüber dem Administrator denkbar. Dass die Einwilligung auch hier als Legitimationsgrund verworfen wird, ist weniger der rechtlichen Bewertung als ihrer praktischen Wirksamkeit geschuldet. Einwilligungen können ständig widerrufen werden und schaffen daher für den Verantwortlichen nicht die hinreichende Rechtssicherheit (Steinrötter, 2021, S. 384). Die **Einwilligung scheidet** folglich als Rechtsgrundlage für die Verarbeitung von personenbezogenen Daten **aus** (Quiel, 2018, S. 571; Steinrötter, 2021, S. 384; i. Erg. ebenso Schrey/Thalhofer, 2017, S. 1434).

Stattdessen könnte sich die Zulässigkeit der Verarbeitung personenbezogener Daten aus **Art. 6 Abs. 1 lit. b DS-GVO** i. V. m. mit einem Vertrag ergeben. Die Verarbeitung von personenbezogenen Daten ist zulässig, wenn sie zur **Erfüllung eines Vertrages**, dessen Vertragspartei die betroffene Person ist, erforderlich ist. Bei **permissioned Blockchain** liegt der Vertrag, der die Verarbeitung der Daten erforderlich macht, regelmäßig in dem Verhältnis zwischen dem Administrator und dem Betroffenen (Steinrötter, 2021, S. 385). Zumindest bei permissioned Blockchain kann die Verarbeitung daher auf die Rechtsgrundlage des Art. 6 Abs. 1 lit. b DS-GVO gestützt werden.

Ein „Nutzungsvertrag“ mit dem Netzwerk, der bei Beitritt in das Netzwerk geschlossen wird und die Datenverarbeitung erforderlich macht, scheidet bei **permissionless Blockchain** regelmäßig aus. Es fehlt an den erforderlichen essentialia negotii<sup>61</sup>, die für das Vorliegen eines Vertrages zwingend sind. Statt auf einen allgemeinen „Nutzungsvertrag“ könnte bei permissionless Blockchain im Falle von Einzeltransaktionen aber auf das konkrete vertragliche Verhältnis zwischen den Nutzern abgestellt werden. Nimmt man einen Vertrag im Einzelfall bei Transaktionen an (vgl. zur Möglichkeit des Vertragsschlusses auf einer Blockchain: 4.2), so kommt die Durchführung dieses Vertrages als Legitimationsgrundlage in Betracht, wenn er die Datenverarbeitung erforderlich macht (Schrey/Thalhofer, 2017, S. 1434; Quiel, 2018, S. 572; Steinrötter, 2021, S. 385).

Neben der Rechtsgrundlage aus Art. 6 Abs. 1 lit. b DS-GVO kann die Verarbeitung auch aufgrund eines **berechtigten Interesses des Verantwortlichen** oder eines Dritten gem. Art. 6 Abs. 1 lit. f DS-GVO legitimiert sein. Die Abwägung hat unter Berücksichtigung der jeweiligen Interessen im Einzelfall zu erfolgen (Quiel, 2018, S. 572). Das kann insbesondere dann sinnvoll sein, wenn der Betroffene nicht selbst Beteiligter einer Transaktion ist, sondern die Daten eines Dritten verarbeitet werden sollen (Steinrötter, 2021, S. 385), sodass ein zu erfüllender Vertrag unter Beteiligung des Betroffenen nicht gegeben ist. Die Rechtsgrundlage des berechtigten Interesses stellt die Parteien jedoch vor nicht unerhebliche Rechtsunsicherheiten. Als Kriterien für die Abwägung können hierbei die Sensibilität der Daten (Art. 9 DS-GVO), die dauerhafte Speicherung der Daten auf der Blockchain sowie die Sicherheitsvorteile, die mit einer Blockchain einhergehen können, berücksichtigt werden (vgl. Steinrötter, 2021, S. 385; i. Erg. ablehnend Schrey/Thalhofer, 2017, S. 1434).

Besondere Berücksichtigung bedarf im Übrigen der Aspekt, dass bei einer Verarbeitung von Daten auf einer Blockchain regelmäßig eine **Übermittlung ins EU-Ausland** stattfinden wird, sodass die Art. 44 ff. DS-GVO einschlägig wären (Steinrötter, 2021, S. 385 f.). Friktionen mit der Datenübermittlung ins EU-Ausland können nur bei permissioned Blockchain vermieden werden, indem entweder die territoriale Ausbreitung auf den EU-/EWR-Raum begrenzt wird oder indem die Anforderung des Art. 44 ff. DS-GVO erfüllt werden (Steinrötter, 2021, S. 386). Zwar verbieten die Art. 44 ff. DS-GVO die Übermittlung in ein Drittland nicht, sie stellen sie aber unter besondere Zulässigkeitsanforderungen.

---

61 Latein: „die wesentlichen Geschäftseigenschaften“.

Im Ergebnis kann eine Legitimationsgrundlage für die Verarbeitung von personenbezogenen Daten eines **Betroffenen**, der selbst an der **Transaktion beteiligt** ist, **regelmäßig gefunden** werden. Für **unbeteiligte Dritte** als Betroffene ist das zwar **zweifelhaft**, aber nicht ausgeschlossen. Es zeigen sich erhebliche Vorteile von permissioned gegenüber permissionless Blockchain bei der Einhaltung dieser Anforderungen des Datenschutzes.

### **Grundsätze für die Verarbeitung personenbezogener Daten, Art. 5 DS-GVO**

Die DS-GVO legt neben konkreten Pflichten, die der Verantwortliche bei der Datenverarbeitung zu beachten hat, auch übergreifende Prinzipien fest, für deren Einhaltung der Verantwortliche einzustehen hat (Art. 5 DS-GVO). Das Prinzip, wonach die Verarbeitung von personenbezogenen Daten auf **rechtmäßige Weise** und nach **Treu und Glauben** (Art. 5 Abs. 1 lit. a DS-GVO) erfolgen muss, wiederholt das zu Art. 6 DS-GVO Gesagte.

Fraglich erscheint die Konformität der Blockchain-Anwendungen mit dem Prinzip der **Datenminimierung** (Art. 5 Abs. 1 lit. c DS-GVO). Der Umfang, der in der Blockchain gespeicherten Daten, wächst zunehmend an, da die Blockchain mit jedem Block länger wird und bei jedem Full-Node eine Kopie der Blockchain hinterlegt wird (Steinrötter, 2021, S. 386). Bei Blockchain-Anwendungen werden folglich zahlreiche redundante Datensätze erstellt und verarbeitet. Dieser Umstand allein soll jedoch noch nicht von vorneherein zu einer Unvereinbarkeit der Blockchain mit dem Grundsatz der Datenminimierung führen, sondern nur wenn mehr Daten als unbedingt erforderlich verarbeitet werden (Krupar/Strassemeyer, 2018, S. 751; skeptisch Finck, 2018, S. 28 f.; Quiel, 2018, S. 571). Das sei hier nicht der Fall, weil die Vielzahl der Datenkopien für das Funktionieren der Blockchain entscheidend seien. Weiterhin ist es ökonomisch nicht sinnvoll mehr Daten als nötig zu speichern, da dies unmittelbar mit erhöhten Kosten verbunden ist (bei Ethereum z.B. Gas Kosten).

Problematisch sind daneben auch die geforderte sachliche **Richtigkeit und Aktualität** (Art. 5 Abs. 1 lit. d DS-GVO) der personenbezogenen Daten. Damit einher geht die Forderung, dass unrichtige Daten unverzüglich gelöscht oder berichtigt werden. Einmal auf einer Blockchain gespeicherte Daten sind grundsätzlich unveränderlich und können nicht nachträglich berichtigt werden (Bechtolf/Vogt, 2018, 69). Allein für die Zukunft können die Einträge angepasst werden.

Zuletzt könnten Blockchain-Anwendungen im Widerspruch zum Prinzip der **Speicherbegrenzung** (Art. 5 Abs. 1 lit. e DS-GVO) stehen. Das Prinzip besagt, dass Daten nur so lange gespeichert werden sollen, wie es für die festgelegten Zwecke erforderlich ist. Die Blockchain ist gerade so gestaltet, dass nur dann eine Chain (Kette) entsteht, wenn die vorangehenden Blöcke unverändert bleiben. Mit der Veränderung der Daten würde daher auch die Blockchain auseinanderbrechen. Daher soll bei Blockchain die dauerhafte Speicherung auch erforderlich sein (Steinrötter, 2021, S. 386).

Ein Ausgleich mit diesen Konflikten ist insbesondere von Initiatoren neuer Blockchain-Anwendungen zu berücksichtigen, denen gem. Art. 25 Abs. 1 DS-GVO die Verpflichtung zur Berücksichtigung der Grundsätze bei der Gestaltung der Anwendung zukommt (sog. "Privacy by Design", vgl. Quiel, 2018, S. 570 f.).

### **Allgemeines Durchsetzungsproblem der Betroffenenrechte**

Neben diesen Prinzipien für eine Verarbeitung von personenbezogenen Daten stehen den **Betroffenen** verschiedene **Rechte** zu, die sie in Bezug auf die Verarbeitung der personenbezogenen Daten gegen den Verpflichteten geltend machen kann. Die Art. 15 ff. DS-GVO stellen zwingendes Recht dar (Schrey/Thalhofer, 2017, S. 1435; Steinrötter, 2021, S. 386). Im Zusammenhang mit Blockchain kann es zu Durchsetzungsschwierigkeiten in Bezug auf einzelne Rechte des Betroffenen kommen.

Übergreifendes Problem ist die Frage nach der Durchsetzung der Betroffenenrechte gegenüber den Verpflichteten (Finck, 2018, S. 26; Pesch, 2019, S. 19). Durch die Betroffenenrechte wird regelmäßig der Verantwortliche verpflichtet, der dann auf die Mitwirkung seiner Auftragsverarbeiter angewiesen ist. Diese Auftragsverarbeiter sind bei Blockchain-Anwendungen alle Miner und Full-Nodes. Ihnen gegenüber wird der Verantwortliche aber mangels rechtlicher Weisungsbefugnis regelmäßig Schwierigkeiten haben, sie an der Durchsetzung der Rechte des Betroffenen zu beteiligen (Steinrötter, 2021, S. 386). Eine Durchsetzung erscheint darüber hinaus auch aufgrund der globalen Verstreuung der Miner und Full-Nodes im Falle von **permissionless Blockchain** praktisch nur schwerlich möglich. Die grundsätzliche Anwendbarkeit der Betroffenenrechte ist dadurch nicht ausgeschlossen. Diese Durchsetzungsschwierigkeiten können bei einer **permissioned Blockchain** zumindest abgemildert werden. Zwischen dem Administrator und den einzelnen Miner wird hier regelmäßig ein Auftragsverarbeitungsvertrag bestehen, der die Mitwirkung bei der Ausübung der Rechte regelt.

#### **Recht auf Auskunft, Art. 15 DS-GVO**

Im Hinblick auf das Auskunftsrecht gem. Art. 15 DS-GVO wurde teilweise argumentiert, dass die Blockchain öffentlich einsehbar sei und daher die Auskunftsbeglehrende selbst Auskunft nehmen könnte bzw. jeder, der die Blockchain einsehen könne, die Auskunft erteilen kann (Schrey/Thalhofer, 2018, S. 1434 f.; Wendehorst/Gritsch, 2023, Rn. 45). Ob dies für eine Erfüllung des Auskunftsrechts ausreicht, kann jedoch bezweifelt werden. Art. 15 Abs. 1 DS-GVO erfasst auch Auskünfte über Metadaten hinsichtlich der Verarbeitung, die regelmäßig nicht jeder Node erteilen kann (Finck, 2018, S. 30; Steinrötter, 2021, S. 387). Zumindest bei einer permissioned Blockchain besteht mit dem Administrator als Verantwortlicher aber eine zentrale Auskunftsstelle (Steinrötter, 2021, S. 387), die die Auskünfte meist erteilen kann.

#### **Recht auf Löschung und Recht auf “Vergessenwerden”, Art. 17 DS-GVO**

Neben dem Recht auf Auskunft steht der betroffenen Person auch ein Recht auf Löschung gem. Art. 17 Abs. 1 DS-GVO zu. Sind die dort genannten Voraussetzungen erfüllt, so kann die betroffene Person von dem Verantwortlichen *“verlangen, dass sie betreffende personenbezogene Daten unverzüglich gelöscht werden, und der Verantwortliche ist verpflichtet, personenbezogene Daten unverzüglich zu löschen”*. Außerdem ist der Verantwortliche in den Fällen des Abs. 1 verpflichtet die für die Datenverarbeitung Verantwortlichen, die die *“personenbezogenen Daten verarbeiten, darüber zu informieren, dass eine betroffene Person von ihnen die Löschung aller Links zu diesen personenbezogenen Daten oder von Kopien oder Replikationen dieser personenbezogenen Daten verlangt hat“* (Art. 17 Abs. 2 DS-GVO). Dies setzt voraus, dass die personenbezogenen Daten öffentlich gemacht wurden, das Recht auf Löschung nach Abs. 1 besteht und die Maßnahmen unter Berücksichtigung der verfügbaren Technologie und der Implementierungskosten angemessen sind. Die Rechte können nach Art. 17 Abs. 3 DS-GVO ausgeschlossen sein. Man spricht insofern auch von einem Recht auf “Vergessenwerden”.

Die DS-GVO enthält keine Legaldefinition von “löschen”, sodass nicht bereits aufgrund des Wortlautes von vorneherein auf eine absolute Vernichtung der Daten als einzige Lösung geschlossen werden könne (Finck, 2018, S. 31). Dennoch erscheint eine bloße Sperrung oder Verschlüsselung der Inhalt statt einer Löschung nicht ausreichend, um den Anspruch zu erfüllen (Martini/Weinzierl, 2017, S. 1258; Steinrötter, 2021, S. 388; aA Schrey/Thalhofer, 2018, S. 1435, mit Sympathien für diesen Ansatz Finck, 2018, S. 31; Spindler, 2020, S. 735 f.).

Ausgangspunkt der Frage nach der Löschung von personenbezogenen Daten ist die Suche nach **technischen Lösungen**. Ruft man sich die technische Konzeption der Blockchain in Erinnerung, so soll ein *“Dilemma zwischen funktional unmöglichem Vergessen-Können und einem datenschutzrechtlich geforderten Vergessen-Müssen”* zu Tage treten (Martini/Weinzierl, 2017, S. 1251). Die Blockchain ist grundsätzlich so konzipiert, dass sie unveränderlich ist (vgl. nur Bechtolf/Vogt, 2018, S. 69). Eine Löschung der personenbezogenen Daten müsste bei jedem Node vorgenommen werden, der eine Kopie der Blockchain gespeichert hat (Martini/Weinzierl, 2017, S. 1255). Der einzelne Verantwortliche ist nach Art. 17 Abs. 2 DS-GVO aber nur zur Information verpflichtet, die sich jedoch auch regelmäßig als technisch schwerlich machbar darstellen dürfte. Ein solcher Informationskanal sollte bei einer Änderung oder Neuimplementierung von Blockchain-Lösungen berücksichtigt werden (Martini/Weinzierl, 2017, S. 1255, 1257).

Ein Fork zur technischen Durchsetzung des Löschungsrecht scheidet bereits aus den genannten Gründen aus (Finck, 2018, S. 31). Er erscheint nicht Praxis tauglich vor dem Hintergrund, dass die Mehrheit der Nodes an einem solchen Fork mitwirken müssten. Bereits dies ist kaum denkbar. Außerdem wären die damit verbundenen Verwerfungen späterer Transaktionen so umfassend, dass keine punktgenaue Löschung der personenbezogenen Daten erzielt würde, sondern massenhaft Vorgänge gelöscht würden. Das erscheint für das Massenphänomen des datenschutzrechtlichen Löschungsrechts untauglich (iErg auch Bechtolf/Vogt, 2018, S. 70).

Teilweise werden daher stattdessen die technische Abwandlung der Blockchain-Technologie gefordert und - mehr oder weniger vielversprechende - Maßnahmen diskutiert, die eine Konformität erreichen sollen (Martini/Weinzierl, 2017, S. 1256). Jedoch scheinen auch sog. Chameleon-Hashes dabei keine zielführende Lösung zu bieten (Finck, 2018, S. 31).

Demgegenüber geht *Steinrötter* konsequenterweise davon aus, dass Maßnahmen, die zur Löschung von Daten führen würden, bereits konzeptionell der Blockchain widersprechen würden und mit technischen Maßnahmen, die die Löschung erlauben würden, die Vorteile der Blockchain aufgehoben wären (Steinrötter, 2021, S. 388; ebenso Pesch, 2019, S. 19). **Technische Lösungen** für das Löschen von Daten sind daher bei permissionless Blockchain **nicht möglich**.

Zumindest bei **permissioned Blockchain** ist eine Löschung der personenbezogenen Daten hingegen nicht von vorneherein technisch ausgeschlossen. Mit dem Administrator besteht hier eine zentrale Instanz, die das Recht auf Löschung durchsetzen kann (Martini/Weinzierl, 2017, S. 1257; Steinrötter, 2021, S. 388), auch wenn es je nach technischer Implementation der permissioned Blockchain sehr aufwändig sein kann.

Stellt man sich auf den Standpunkt, dass ein Löschen bereits technisch nicht möglich sei, so kann nach **rechtlichen** Lösungen des Konflikts gefragt werden.

Ausgangspunkt stellt die Feststellung des Vorliegens der Tatbestandsvoraussetzungen dar. Diese sind im Einzelfall zu prüfen und können hier nur allgemein behandelt werden. Die Gründe aus Art. 17 Abs. 1 lit. b und c DS-GVO scheidet nach der hier vertretenen Lösung für die Erlaubnisgründe bei Einzeltransaktionen, an denen der Betroffene selbst beteiligt ist, bereits aus. Eine Einwilligung liegt nicht vor. Das Widerspruchsrecht nach Art. 21 DS-GVO greift nur in den Fällen, in denen die Verarbeitung auf ein berechtigtes Interesse nach Art. 6 Abs. 1 lit. e oder f DS-GVO gestützt wird (Martini, 2021, Rn. 22). Das ist hier nur in den Fällen von Daten von Dritten der Fall. Entscheidend erscheint folglich das Vorliegen von Art. 17 Abs. 1 lit. a DS-GVO und der Gründe aus Art. 17 Abs. 1 lit. d-f DS-GVO, deren Vorliegen bei einer abstrakten Betrachtung jedenfalls nicht ausgeschlossen werden kann.

Unterstellt man, dass der Tatbestand erfüllt ist, so stellt sich die Frage, ob der Rechtsfolge eines Anspruchs auf Löschung womöglich rechtliche Grenzen gesetzt sind. Diskutiert wird insoweit, ob der Anspruch auf Löschung bei Blockchain-Anwendungen aufgrund faktischer Unmöglichkeit ausgeschlossen sei (i. Erg. ablehnend Steinrötter, 2021, S. 388). Das Recht dürfe nichts verlangen, was tatsächlich unmöglich sei (ultra pose nemo tenetur, vgl. Hacker, 2020, S. 141). Dies erscheint jedoch problematisch, denn mit dieser Argumentation könnte theoretisch jede datenschutzrelevante Technologie so konzipiert werden, dass eine Löschung tatsächlich unmöglich wäre (Steinrötter, 2021, S. 388). Eine solche "Flucht in die Unmöglichkeit" würde aber den Geltungsanspruch des Rechts verdrehen: Die Technologie würde dann dem Recht die Grenzen setzen und nicht das Recht der Technologie. Daher ist ein Ausschluss des Rechts auf Vergessenwerden aufgrund Unmöglichkeit zu verwerfen.

Andere nehmen an, dass der Anspruch auf Löschung auszuschließen sei, weil ihm die Unveränderlichkeit der Blockchain insgesamt entgegenstehe (Pesch, 2019, S. 19). Ob die Abwägung in der Verhältnismäßigkeit in Anbetracht der starken grundrechtlichen Verankerung des Datenschutzrechts (Art. 8 GRCh) tatsächlich zugunsten der technischen Konzeption der Blockchain ausfallen würde, darf bezweifelt werden (Spindler, 2020, S. 734, ebenso Steinrötter, 2021, S. 388).

Im Ergebnis sei daher der letzte Ausweg eine gesetzgeberische Anpassung des Rechts auf Löschung (vgl. Martini/Weinzierl, 2017, S. 1258; Steinrötter, 2021, S. 388).

#### **Recht auf Berichtigung, Art. 16 DS-GVO**

Vorab ist der Inhalt des Rechts auf Berichtigung zu ermitteln. Das Recht auf Berichtigung besagt, dass die betroffene Person von dem Verantwortlichen unverzüglich die Berichtigung sie betreffender unrichtiger personenbezogener Daten verlangen kann. Entscheidend ist daher, was unter dem Begriff der Berichtigung zu verstehen ist und ob diese die endgültige Löschung der unrichtigen Daten verlangt.

Eine Legaldefinition der Berichtigung enthält die DS-GVO nicht (Kamann/Braun, 2018, Rn. 31). Der Wortlaut ist offen und stellt nicht klar, ob die Berichtigung auch eine Löschung der unrichtigen Daten erfordert. Vielmehr sind auch Berichtigungsmodalitäten denkbar, die eine Berichtigung auch ohne Löschung möglich machen, z.B. durch eine Richtigstellung im Datensatz durch die klar wird welche Daten der Realität entsprechen. Gegen die Forderung einer endgültigen Löschung spricht auch, dass das Recht auf Vergessenwerden gerade nicht in Art. 16, sondern in Art. 17 DS-GVO normiert ist (Kamann/Braun, 2018, Rn. 31). Teleologisch ist der Verzicht auf eine endgültige Löschung zumindest nicht ausgeschlossen. Sinn und Zweck ist die Sicherstellung der Datenrichtigkeit, was auch ohne Löschung erreicht werden kann, wenn dadurch dennoch gesichert ist, dass nur die richtigen Daten verarbeitet werden (Kamann/Braun, 2018, Rn. 31; Steinrötter, 2021, S. 387). Betrachtet man darüber hinaus auch EWG 39, S. 11 so ist erkennbar, dass der Verordnungsgeber davon ausging, dass für die Beseitigung von unrichtigen Daten die Löschung und die Berichtigung in einem Alternativ-Verhältnis stehen.<sup>62</sup>

Daraus ergibt sich, dass das Recht auf Berichtigung nicht die endgültige Löschung der Daten verlangt und damit die Unveränderbarkeit der Blockchain nicht grundsätzlich im Wege steht. Technisch soll sich die Berichtigung daher durch eine sog. **Reverse Transaction** erreichbar sein (Krupar/Strassmeyer, 2018, S. 752, die insoweit von einer teleologischen Reduktion sprechen; Schmid, 2021, Rn. 85; Steinrötter, 2021, S. 387; aA Finck, 2018, S. 29). Durch eine Reverse Transaction wird ein neuer Eintrag auf der Blockchain hinzugefügt, der die bestehenden

---

<sup>62</sup> EWG 39, S. 11 DS-GVO: "Es sollten alle vertretbaren Schritte unternommen werden, damit unrichtige personenbezogene Daten gelöscht oder berichtigt werden."

(fehlerhaften) Einträge richtigstellt. Da das Recht auf Berichtigung aber nicht die endgültige Löschung der fehlerhaften Daten, sondern allein die Sicherstellung der weiteren Verarbeitung von richtigen Daten verlangt, genügt eine solche Richtigstellung den rechtlichen Anforderungen. Durch eine Reverse Transaction kann das Recht auf Berichtigung erfüllt werden.

### Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das europäische Datenschutzrecht im Wege der DS-GVO auf Blockchain Anwendung findet, soweit personenbezogene Daten verarbeitet werden. Dies dürfte den Regelfall darstellen. Die Bestimmung des Verantwortlichen stellt das Datenschutzrecht vor große Herausforderungen. Während bei der **permissionless Blockchain** alle Akteure entweder als Verantwortliche oder Auftragsverarbeiter zu qualifizieren sind, ist bei der **permissioned Blockchain** jedenfalls der Administrator als zentrale Stelle Verantwortlicher. Hinzutritt bei Einzeltransaktionen die Verantwortlichkeit der Transaktionsbeteiligten. Miner sind nur Auftragsverarbeiter.

Jedenfalls ist eine **Erlaubnisgrundlage** nach Art. 6 Abs. 1 DS-GVO für die rechtmäßige Verarbeitung personenbezogener Daten zu verlangen. Fehlt es an einer solchen Grundlage, ist die Verarbeitung der Daten rechtswidrig. Für die Verarbeitung von personenbezogenen Daten im Zusammenhang mit Einzeltransaktionen konnte in der Erforderlichkeit der Verarbeitung der Daten für die Erfüllung eines Vertrages (Art. 6 Abs. 1 lit. b DS-GVO) eine Rechtsgrundlage gefunden werden. Für Dritte ist mit Art. 6 Abs. 1 lit. f DS-GVO eine Rechtsgrundlage aufgrund berechtigten Interesses zumindest denkbar, dürfte aber wohl in den meisten Fällen in der Abwägung unterliegen. Das Ergebnis hängt hier jedenfalls vom Einzelfall ab.

Die DS-GVO wurde für zentrale Datenverarbeitungsmodelle entwickelt und führt daher zu **zahlreichen Konflikten zwischen Blockchain und Datenschutz** (Finck, 2018, S. 17 ff.). Prüft man die Betroffenenrecht, so fällt insbesondere der Konflikt der Blockchain-Technologie mit dem **Recht auf Vergessenwerden** auf. Überall dort, wo eine nachträgliche Veränderung der Daten gefordert wird, kommt die Blockchain an die Grenzen der technischen Umsetzbarkeit. Zwar sind im Ansatz technische Lösungen denkbar, diese gehen aber mit anderen Ausgestaltungsnachteilen einher. Die Erfüllung der rechtlichen Anforderung kann daher - wenn überhaupt - nur zu hohen Kosten sichergestellt werden.

Darüber hinaus ist dem **grenzüberschreitenden Datentransfer** und seinen datenschutzrechtlichen Restriktionen gem. Art. 44 ff. DS-GVO besondere Bedeutung zu schenken (vgl. Finck, 2018, S. 27 f.; Krupar/Strassemeyer, 2018, S. 751). Häufig wird es auch hier zu datenschutzrechtlich bedenklichen Übermittlungsvorgängen kommen, da die (zumindest permissionless) Blockchain ein globales Phänomen ist, das nicht auf EU-/EWR-Staaten beschränkt ist. Zahlreiche Blockchain laufen auf Nodes, die über die ganze Welt verstreut sind. Bei der permissioned Blockchain können zahlreiche dieser Probleme zwar überwunden werden, bspw. durch vertragliche Verpflichtung zur Einhaltung der Bedingungen der Art. 44 ff. DS-GVO (Krupar/Strassemeyer, 2018, S. 751; Spindler, 2020, S. 740). Bei permissionless Blockchain ist die Einhaltung der Anforderungen aber wohl regelmäßig ausgeschlossen.

Nach dem bestehenden Recht muss der Einsatz von permissionless Blockchain daher regelmäßig **generell als datenschutzwidrig** eingestuft werden. Dem Verantwortlichen könnte daher häufig ein Bußgeld drohen (Steinrötter, 2021, S. 389; ähnlich Finck, 2018, S. 17 ff.). Daher sprechen sich einige Stimmen in der Literatur für eine gesetzgeberische **Anpassung des Datenschutzrechts de lege ferenda**<sup>63</sup> aus; zumindest dann, wenn die Vorteile der Anwendungsfälle die Bedenken im Hinblick auf den Persönlichkeitsschutz überwiegen

---

63 Latein: "vom Standpunkt des zukünftigen Rechts aus".

(allgemein: Krupar/Strassemeyer, 2018, S. 753; zumindest für staatliche Anwendungsbereiche<sup>64</sup> befürwortend Martini/Weinzierl, 2017, S. 1258; generell skeptisch Steinrötter, 2021, S. 389 f.).

Teilweise wird auch über die **Gestaltung der konkreten Blockchain** versucht die Vereinbarkeit mit dem Datenschutz herzustellen. Ein Ansatz hierfür ist beispielsweise die Beschränkung der Datenverarbeitung auf nicht-personenbezogene Daten, um die Anwendbarkeit der datenschutzrechtlichen Regelungen auszuschließen (vgl. Schmid, 2021, Rn. 93 ff.). Insgesamt dürften diese Lösungen jedoch zumindest bei permissionless Blockchain nur von geringem Erfolg gekrönt sein.

Zumindest bei **permissioned Blockchains** können die **datenschutzrechtlichen Konflikte** im Wesentlichen **abgemildert** oder gar zu **überwunden werden** (Steinrötter, 2021, S. 389 m. N. zur Beratungspraxis). Zu Bedenken ist allerdings, dass solche permissioned Blockchains häufig mit Nachteilen im Hinblick auf die Sicherheitsarchitektur verbunden sind und zahlreiche Vorteile der Blockchain-Technologie dabei verloren gehen.

## 4.4 Analyse des regulatorischen Rahmens

Die Analyse des regulatorischen Rahmens für den Einsatz von Blockchain und DLT-Lösungen verfolgt einen anderen Blickwinkel als die vorstehenden Analyseteile. Die bestehenden rechtlichen Anforderungen für Blockchain-Anwendungen sollen in einem ersten Schritt auf Anreize für einen nachhaltigen Einsatz von Blockchain-Lösungen untersucht werden. Darauf aufbauend werden Empfehlungen für die Schaffung eines Rechtsrahmens, der eine nicht nachhaltige Nutzung von DLT-Lösungen einschränkt oder verhindert, entwickelt (vgl. Abschnitt 5).

### 4.4.1 Methode: Ökologische Analyse des Rechts

Methodisch erfolgt die Analyse der Nachhaltigkeitsanreize im bestehenden Regulierungsrecht aus dem Blickwinkel der ökologischen Analyse des Rechts. Nachhaltigkeitsaspekte dienen dabei der Beurteilung rechtlicher Regelungen als Analyse- und Zielrahmen (Bach/Kieninger, 2021, S. 1088 ff.; Zech, 2022, S. 124, 126).

Die ökonomische Analyse des Rechts ist unter dem Begriff “Law and Economics” bereits weit verbreitet. In einer Weiterentwicklung der ökonomischen Analyse des Rechts will die “ökologische Analyse des Rechts” Nachhaltigkeitsaspekte bei der Analyse des Rechts in den Vordergrund rücken (Bach/Kieninger, 2021, S. 1088 ff.). Ziel ist es den Aspekt der Nachhaltigkeit bei der Auslegung, Bewertung und Weiterentwicklung von Normen im Wege einer Folgenabschätzung zu berücksichtigen (Bach/Kieninger, 2021, S. 1092).

Die Aufgabe, die dem Recht bei der Erreichung von Nachhaltigkeitszielen zugemessen wird, liegt im Ausgleich von fehlenden, intrinsischen Marktmechanismen zur Erreichung von Nachhaltigkeit (Bach/Kieninger, 2021, S. 1092). Dafür muss das Recht Anreize für die ökologisch vorzugswürdige Alternative schaffen (Bach/Kieninger, 2021, S. 1094).

#### Begriff der Nachhaltigkeit

Rechtliche Grundlage der Berücksichtigung von Nachhaltigkeit im Recht bildet dabei die Verpflichtung des deutschen und europäischen Gesetzgebers auf den Schutz der natürlichen Lebensgrundlage in Art. 20a GG bzw. Art. 3 Abs. 3 EUV, 37 GRCh und 11 AEUV (Bach/Kieninger, 2021, S. 1089 f.; zur Pflicht aus Art. 20a GG vgl. auch BVerfG Beschl. v. 24.03.2021 - 1 BvR 2656/18 und andere = BVerfGE 157, 30). Die Folgen der Gesetze und des Rechts für die Umwelt

---

<sup>64</sup> Vgl. Beispiele nach der Bundesnetzagentur (2024).

sind vom Gesetzgeber, aber auch von den rechtsanwendenden Gerichten als objektiv-rechtliche Staatszielbestimmungen unmittelbar zu berücksichtigen (BVerwG Urt. v. 23.11.2005 - 8 C 14.04 = NVwZ 2006, 595 Rn. 20; BGH Urt. v. 27.01.2006 - V ZR 46/05 = NJW 2006, 1424 Rn. 11; Bach/Kieninger, 2021, S. 1089 m. w. N.). Entscheidend ist für die Analyse jedoch welcher Nachhaltigkeitsbegriff verfolgt wird. Hier sind insbesondere zwei widerstreitende Begriffe zu unterscheiden und abzugrenzen.

### Begriff der Nachhaltigkeit

Die **Resolution der Generalversammlung der Vereinten Nationen** „Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development“ von 2015 fasst den Begriff der Nachhaltigkeit **weit**. Danach wird Nachhaltigkeit in 17 Unterziele (Sustainable Development Goals) unterteilt. Umfasst sind hier nicht nur umwelt- und naturbezogene Aspekte, sondern auch Ziele wie die Herstellung von Geschlechtergerechtigkeit, die Sicherung lebenslangen Lernens und die Schaffung rechenschaftspflichtiger Institutionen.

Demgegenüber nimmt der **ökologische Begriff** der Nachhaltigkeit in erster Linie den Verbrauch von Ressourcen in den Blick (Zech, 2022, S. 125). Nachhaltigkeit meint danach die Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlage für die bestehende und künftige Generationen durch Sicherung der Ressourcen (Kahl, 2018, Art. 11 Rn. 22 m. w. N.; ebenso Bach/Kieninger, 2021, S. 1088; Zech, 2022, S. 125; Epiney, 2018, Art. 20a Rn. 103) und der Reduktion des Ausstoßes von klimaschädlichen Treibhausgasen. Dieser Nachhaltigkeitsbegriff spiegelt sich auch in Art. 11 AEUV und in Art. 20a GG wider (Epiney, 2018, Art. 20a Rn. 103; Kahl, 2018, Art. 11 Rn. 22). Dadurch werden die Unsicherheiten, die bei der rechtlichen Analyse mit dem weiten Nachhaltigkeitsbegriff verbunden wären, vermieden (Epiney, 2018, Art. 20a Rn. 101). Stattdessen ermöglicht der ökologische Nachhaltigkeitsbegriff eine ökonomisch präzise Analyse des Rechts (Zech, 2022, S. 126). Die folgende Analyse orientiert sich daher am ökologischen Nachhaltigkeitsbegriff.

### Analyse der Nachhaltigkeit bei der Digitalisierung

Analysiert man Rechtsnormen, die einen digitalen Kontext regulieren sollen, so ist zwischen zwei Perspektiven auf die digitalen Technologien zu unterscheiden: Digitalisierung als Lösung (zu Blockchain als Lösung von Umweltproblemen) und Digitalisierung als Verursacher von Umweltproblemen (vgl. zu dieser Unterscheidung Zech, 2022, S. 126). Aus dem hier eingenommenen Blickwinkel soll die Digitalisierung in erster Linie als **Teil des Problems der Umweltverschmutzung** betrachtet werden. Zentrale Aspekte stellen dabei der Energieaufwand von Blockchain-Lösungen und der im Zusammenhang mit der Digitalisierung anfallende Elektroschrott dar. Durch sich rasch überholende Generationen von Geräten, die stetig ausgetauscht werden müssen, entstehen große Schrottmengen. Dieser Ressourcenverbrauch steht in Konflikt mit dem Ziel der Nachhaltigkeit im Sinne eines ressourcenschonenden Umgangs mit der Umwelt.

### Begriff des Anreizes

Darüber hinaus muss vor dem Hintergrund einer fehlenden einheitlichen Definition (Incentive, vgl. Wolff, 2020, S. 8) offengelegt werden, wie der Begriff des Anreizes in der folgenden Analyse verstanden wird. Anreize sind **monetäre** und **nicht-monetäre Faktoren**, die das **Verhalten von Individuen, Unternehmen oder anderen Akteuren beeinflussen**. Sie können aktiv als **Belohnungen** oder **Bestrafung** ausgestaltet sein, die eine Gruppe von Akteuren dazu veranlassen sollen, sich so zu verhalten, dass die von anderen **Akteuren gewünschten Ziele berücksichtigt** bzw. **erreicht** werden.

Ökonomische Instrumente wie Steuern oder Subventionen nutzen Anreize, um bestimmte Ergebnisse zu erzielen, ohne dabei die individuelle Entscheidungsfreiheit der betroffenen Akteure stark einzuschränken. Hierbei ist es nicht immer notwendig, das Ziel quantitativ zu bestimmen. Ein Beispiel hierfür ist die **Demeritorisierungsabgabe**, wie von Gawel et al. (2011, S. 72) beschrieben.

Es ist wichtig anzumerken, dass auch ein **Verbot als Anreiz** fungiert, da es das Verhalten lenkt. Allerdings zählen Verbote normalerweise nicht zu den ökonomischen Instrumenten, da sie den Akteuren jeglichen Spielraum nehmen, wie sie das Ziel erreichen können. Dies führt in der Regel zu ineffizienten Ergebnissen.

Nachfolgend wird der Begriff „Anreiz“ ausschließlich im Zusammenhang mit Maßnahmen, bei denen sich Unternehmen im legalen Rahmen bewegen verwendet (im Sinne eines ökonomischen Instruments), jedoch nicht für unmittelbare Gebote oder Verbote. Solche Rechtsakte werden somit grundsätzlich vom Begriff der Anreize ausgeschlossen, die einen unmittelbaren Rechtsbefehl aussprechen (vgl. auch Wolff, 2020, S. 10).

#### 4.4.2 Darstellung des regulatorischen Rahmens

In den letzten Jahren wurden sowohl vom deutschen als auch dem europäischen Gesetzgeber zahlreiche Regelungen erlassen, die sich mit Blockchain-Anwendungen beschäftigen. Der Schwerpunkt der Regulierung lag dabei im Bereich der Finanzmarktregulierung. Die Vorschriften sind dabei regelmäßig technologieoffen formuliert, d.h. sie knüpfen nicht unmittelbar an den Einsatz von Blockchain- oder DLT-Lösungen als Tatbestandsbedingung an. Jedoch lassen sich regelmäßig Sachverhalte, die gerade durch die Blockchain-Technologie eine besondere Dynamik erfahren haben unter die Normen fassen (z.B.: E-Geld iSd § 1 Abs. 2 S. 3 ZAG).

Eine umfassende Darstellung des regulatorischen Rahmens für Blockchain-Anwendungen hängt vom jeweiligen Einzelfall ab und kann abstrakt nicht geleistet werden. Die Anforderungen an die rechtliche Zulässigkeit einer Blockchain-Anwendung ist im Einzelfall zu prüfen. So können sich beispielsweise bei der Anwendung von Blockchain-basierten Smart Contracts bei sog. Smart Grids regulierungsrechtliche Fragen des Energierechts ergeben, die hier nicht weiter behandelt werden können (vgl. bspw. Overkamp/Schings, 2019).

Vorliegend sollen **drei ausgewählte Konstellationen** betrachtet werden, die eine besondere regulatorische Aufmerksamkeit erfahren haben und darüber hinaus für die Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit von Blockchain von Bedeutung sind: **Kryptotoken, Smart Contracts** und die allgemeine **Förderung von Blockchain- und DLT-Lösungen**.

##### 4.4.2.1 Regulatorischer Rahmen: Kryptotoken

Die Regulierung von Kryptowerten und Kryptotoken waren zentraler Gegenstand der gesetzgeberischen Regulierungsaktivität auf deutscher und europäischer Ebene. In diesem Zusammenhang sind drei wesentliche Arten von Kryptotoken zu unterscheiden: Payment-, Utility- und Security Tokens. Diese sind in der nachfolgenden Box im Detail beschrieben.

### Erscheinungsformen von Kryptotoken

Unter **Payment Token** (auch als Currency Token bezeichnet) versteht man solche Token, deren Zweck der Einsatz als Zahlungsmittel ist. Sie stellen keinen Anspruch gegenüber einem Emittenten dar. Ihr Wert ergibt sich aus ihrer Funktion als Zahlungsmittel und ihrer begrenzten Vermehrung (vgl. Fromberger/Zimmermann, 2021, Kap. 1 Rn. 70). Bekanntestes Beispiel für einen Payment Token ist Bitcoin.

**Utility Token** sind die Verkörperung eines Anspruchs gegen den Emittenten auf eine Leistung (z.B. eine Ware oder Dienstleistung). Sie ähneln einem Gutschein und verkörpern Nutzungsrechte an einer Dienstleistung, meist im Zusammenhang mit Smart Contracts. Utility Token können auch Stimmrechte zur Änderung der Software und damit der Funktionalität der Ware oder der Dienstleistung vermitteln. Sie sind auf einem Sekundärmarkt handelbar (vgl. Fromberger/Zimmermann, 2021, Kap. 1 Rn. 73 und BMF, 2022, Rn. 3).

**Security Token** sind in einem Token verbriefte Ansprüche auf Gewinnausschüttungen gegen einen Emittenten, auf Zahlung eines Zinses oder die Verbriefung von Mitbestimmungsrechten an einer Gesellschaft. Sie ähneln daher Wertpapieren und können eigen- oder fremdkapitalähnliche Rechte verkörpern (vgl. Fromberger/Zimmermann, 2021, Kap. 1 Rn. 71 f.).

Token können auch eine Kombination aus den zuvor beschriebenen Kategorien beinhalten (BMF, 2022, Rn. 3).

Die jeweilige Einordnung des Tokens muss im konkreten Einzelfall erfolgen. Daraus ergeben sich dann Implikationen für die regulierungsrechtliche Behandlung des Tokens.

### Finanzmarktregulierung

Besonderer Schwerpunkt der Regulierungsaktivität der letzten Jahre im Zusammenhang mit Blockchain-Anwendungen bildet das Recht der Finanzmarktregulierung. Im Mittelpunkt der **deutschen Finanzmarktregulierung** steht der Umgang mit und die Regulierung von Finanzinstrumenten (§ 1 Abs. 11 KWG, vgl. Siedler, 2021, § 7 Rn. 29). Als solche wurden durch die Aufnahme von Kryptowerten in die Liste des § 1 Abs. 11 KWG auch Token von der Finanzmarktregulierung erfasst (Siedler, 2021, § 7 Rn. 50). Seit 2020 enthält das KWG den Begriff der Kryptowerte, die von § 1 Abs. 11 S. 4, 5 KWG legaldefiniert werden und Finanzinstrumente darstellen (§ 1 Abs. 11 Nr. 10 KWG). Entscheidend ist hierbei insbesondere auch die Abgrenzung vom sog. E-Geld iSd § 2 Abs. 1 Nr. 10 ZAG. Kryptowerte und E-Geld stehen zueinander in einem Ausschließlichkeitsverhältnis. Weitere Anpassungen fanden unter anderem auch im Wertpapierinstitutsgesetz (WpIG), §§ 2, 86 WpIG, dem Anlegerentschädigungsgesetz (AnlEntG), § 1 Abs. 2 AnlEntG statt. Daneben wurden Regelungen in § 284 Kapitalanlagegesetzbuch (KAGB) zu Spezial-Alternative Investmentfonds (Spezial-AIF) getroffen.

Die Definition des **Kryptowertes** knüpft dabei – anders als der Begriff *Kryptowert* vermuten lässt – nicht von vorneherein an die Darstellung des Wertes auf einer Blockchain oder DLT-Lösung an. Vielmehr kommt es allein auf die digitale Darstellung des Wertes an (§ 1 Abs. 11 S. 4 KWG). Der Begriff ist mithin technologieneutral gewählt (Siedler, 2021, § 7 Rn. 64).

Voraussetzung ist allein die Werthaltigkeit des Instruments, die allein dann gewährleistet sei, wenn das Instrument nicht beliebig vervielfältigt werden kann (Siedler, 2021, § 7 Rn. 63 f.).

Erfasst sind nun vom Begriff des Kryptowertes gem. § 1 Abs. 11 S. 1 Nr. 10, S. 4, 5 KWG **Payment Token**, wie bspw. Bitcoin, deren Zweck in erster Linie der Einsatz in Zahlvorgängen ist (Rennig, 2020, S. 26; Maume/Siadat, 2023, S. 1169; Schäfer, 2023, KWG § 1 Rn. 300c). **Security Token**

waren bereits vor der Einführung gem. § 1 Abs. 11 S. 1 Nr. 3 bzw. 8 KWG erfasst, während **Utility Token** vom KWG nicht erfasst sind (Maume/Siadat, 2023, S. 1169).

Die Folge der Einstufung als Finanzinstruments ist die Erstreckung der **Erlaubnispflicht** auf Unternehmen, die die Verwahrung, Verwaltung und Sicherung von Kryptowerten oder kryptografischen Schlüsseln betreiben (Kryptoverwahrgeschäft), §§ 1 Abs. 1a S. 2 Nr. 6 KWG, 32 Abs. 1 KWG.

Des Weiteren wurden im **Zahlungsdienstenaufsichtsgesetz** Regelungen hinsichtlich sog. **E-Geldes** getroffen, das gem. § 1 Abs. 2 S. 3 ZAG einen "elektronisch (...) gespeicherten **monetäre Wert** in Form einer Forderung an den Emittenten, der gegen Zahlung eines *Geldbetrages* ausgestellt wird" darstellt. Dabei ist der Begriff des E-Geldes technologieneutral ausgestaltet, d.h. E-Geld kann auf einer Blockchain aufbauen, muss aber nicht. **Payment Token** wie Bitcoin verkörpern keine Forderung an den Emittenten, sodass sie nicht als E-Geld einzustufen sind. Beispiele für sog. E-Geld sind Prepaid-Kreditkarten.

Weitere Neuerungen im **Wertpapierrecht** haben sich durch das elektronische Wertpapiergesetz (eWpG) v. 09.06.2021 ergeben, wonach gem. § 2 Abs. 1 eWpG ein Wertpapier nicht mehr allein aufgrund einer Urkunde begeben werden kann, sondern auch als elektronisches Wertpapier indem der Emittent an Stelle der Ausstellung einer Wertpapierurkunde eine Eintragung in ein elektronisches Wertpapierregister (§ 4 Abs. 1 eWpG) bewirkt. Neben zentralen Registern (§ 12 eWpG) kann ein elektronisches Wertpapierregister auch ein Kryptowertpapierregister gem. § 16 eWpG sein. Ein solches Register setzt gem. § 16 Abs. 1 eWpG die Führung des Registers auf einem fälschungssicheren Aufzeichnungssystem, in dem Daten in der Zeitfolge protokolliert und gegen unbefugte Löschung sowie nachträgliche Veränderung geschützt gespeichert werden, voraus. Die registerführende Stelle ist, gem. § 16 Abs. 2 eWpG wer vom Emittenten gegenüber dem Inhaber als solche benannt wird. Unterbleibt eine solche Benennung, gilt der Emittent als registerführende Stelle. Damit werden in der Regel Blockchain-basierte Register gemeint (Lehmann, 2020, S. 435), der Ansatz ist jedoch grundsätzlich **technologieneutral** (Casper, 2021, § 28 Rn. 21). Der Anwendungsbereich wurde noch nicht für Aktien geöffnet, sondern nur für Inhaberschuldverschreibungen oder Kryptofondsanteile (§ 95 Abs. 1 KAGB, § 1 KryptoFAG; Maume/Siadat, 2023, S. 1170) Durch das "Zukunftsfinanzierungsgesetz" soll der Anwendungsbereich auch auf Aktien erstreckt werden (Vgl. BMJ/BMF, 2022, S. 3).

Die Einordnung der Kryptotoken kann auf **europäischer Ebene** von der Einordnung auf deutscher Ebene abweichen. Auf europäischer Ebene kommt es hinsichtlich der Erfassung von Kryptotoken unter den Begriff der Finanzinstrumente iSd Art. 4 Abs. 1 Nr. 15 **MiFID-II-RL**<sup>65</sup> i. V. m. Anhang I C wesentlich auf die Auslegung des Begriffs des übertragbaren Wertpapiers iSd Art. 4 Abs. 1 Nr. 44 MiFID-II-RL an. Der Begriff des Finanzinstruments iSd Art. 4 Abs. 1 Nr. 15 MiFID-II-RL wurde durch die Aufnahme von "mittels Distributed Ledger Technologie emittierter Instrumente" darüber hinaus an die neue Rechtsrealität angepasst. Demnach sind übertragbare Wertpapiere iSd Art. 4 Abs. 1 Nr. 44 MiFID-II-RL Finanzinstrumente iSd Verordnung. Um eine einheitliche Auslegung mit anderen Wertpapieren sicherzustellen, sei eine Ähnlichkeit der Token mit den in Art. 4 Abs. 1 Nr. 44 MiFID-II-RL genannten Wertpapieren entscheiden. Voraussetzung ist daher ein eigen- oder fremdkapitalähnlicher Anspruch gegen den Aussteller, der durch den Token dargestellt wird (vgl. BaFin, 2018, S. 61).

65 RICHTLINIE 2014/65/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES v. 15.05.2014 über Märkte für Finanzinstrumente sowie zur Änderung der Richtlinien 2002/92/EG und 2011/61/EU (Neufassung), ABl. 2014, L 173/482.

**Payment Token** verkörpern mangels Emittenten keinen Anspruch gegen den Aussteller. Sie sind daher ebenso wenig vom Begriff der Finanzinstrumente der MiFID-II-RL erfasst wie **Utility-Token**, die einen Anspruch auf Dienstleistungen oder Waren “verbriefen” (Siedler, 2021, § 7 Rn. 43 f.). Demgegenüber begründen **Security Token** zugunsten des Inhabers wertpapierähnliche Rechte und sind daher vom Begriff der Finanzinstrumente der MiFID-II-RL erfasst (Maume/Siadat, 2023, S. 1168).

Neuerungen hat das europäische Recht durch die Verabschiedung der MiCA-VO erfahren. Die **Verordnung (EU) 2023/1114** des Europäischen Parlaments und des Rates vom 31.05.2023 über **Märkte für Kryptowerte (MiCA-VO)**<sup>66</sup> wurde am 09.06.2022 veröffentlicht und trat am zwanzigsten Tag nach der Veröffentlichung in Kraft. Die unterschiedlichen Teile der Verordnung gelten grundsätzlich ab dem 30.12.2024, sofern nicht in Art. 149 Abs. 3 und 4 MiCA-VO etwas Abweichendes geregelt wurde. Weitere Änderungen ergeben sich aus der **Verordnung (EU) 2022/858** des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30.05.2022 über eine **Pilotregelung für auf Basis der DLT basierende Marktinfrastrukturen (DLT-Pilot-Regime)**.

Voraussetzung für die Anwendung der MiCA-VO ist, dass es sich bei dem jeweiligen Kryptowert **nicht** um ein Finanzinstrument gem. Art. 4 Abs. 1 Nr. 15 MiFID-II-RL handelt (Art. 2 Abs. 3 MiCA-VO). Dadurch regeln die MiCA-VO und das DLT-Pilot-Regime unterschiedliche Sachverhalte: Während das DLT-Pilot-Regime Finanzinstrumente iSd MiFID-II-RL erfasst, regelt die MiCA-VO nur solche Kryptowerte, die keine Finanzinstrumente sind (vgl. Romba/Oppenheim/Pfaf, 2023, Rn. 3 ff.).

Die MiCA-VO regelt den **Begriff des Kryptowertes auf europäischer Ebene**. Als Kryptowert ist gem. Art. 3 Abs. 1 Nr. 5 MiCA-VO die “digitale Darstellung eines Werts oder eines Rechts, der bzw. das unter Verwendung der Distributed Ledger Technologie oder einer ähnlichen Technologie elektronisch übertragen und gespeichert werden kann” zu verstehen. Solche Kryptowerte stellen vermögenswertereferenzierte Token (Art. 3 Abs. 1 Nr. 6 MiCA-VO), E-Geld-Token (Art. 3 Abs. 1 Nr. 7 MiCA-VO) und Utility-Token (Art. 3 Abs. 1 Nr. 9 MiCA-VO) dar. Hierunter sind **Payment Token**, Stablecoins als besondere Unterform der Payment Token (Zickgraf, 2021a, S. 199) und **Utility Token** zu verstehen (Maume/Siadat, 2023, S. 1169; Zickgraf, 2021a, S. 198 f.). Non-fungible-Token (NFT), d.h. Kryptotoken, die etwas Einzigartiges abbilden (z.B. eine Identität oder ein Kunstwerk), sind von der MiCA-VO nicht erfasst (vgl. EWG 10 MiCA-VO). Weiterhin werden Dezentrale Finanzkonstrukte (DeFi) nicht in MiCA-VO geregelt.

Die MiCA-VO und das DLT-Pilot-Regime verfolgen verschiedene **Ziele**. Während das DLT-Pilot-Regime eine Umgebung schaffen soll in denen neue Technologien erprobt werden können (EWG 1 DLT-Pilot-Regime), verfolgt die MiCA-VO neben der Förderung des Einsatzes von DLT- und Blockchain-Lösungen im Finanzsektor auch das Ziel der Festlegung von einheitlichen Anforderungen für das öffentliche Angebot von anderen Kryptowerten als vermögenswertreferenzierten Token und E-Geld-Token und die Zulassung zum Handel auf einer Handelsplattform von anderen Kryptowerten als vermögenswertereferenzierten Token und E-Geld-Token, sowie von einheitlichen Anforderungen für Anbieter von Kryptowerte-Dienstleistungen (Art. 1 Abs. 1 MiCA-VO).

Während die Art. 4 ff. der MiCA-VO eine negative Abgrenzung vornimmt und daher alle Kryptowerte iSd Verordnung erfasst, die nicht vermögenswertereferenzierte Token oder E-Geld sind, erfassen die Art. 16 ff. MiCA-VO nur vermögenswertereferenzierte Token (sog. Stablecoins, vgl. Zickgraf, 2021a, S. 199) und Art. 48 ff. MiCA-VO nur E-Geld-Token.

66 VO (EU) 2023/1114 v. 31.5.2023 über Märkte für Kryptowerte und zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 1093/2010 und (EU) Nr. 1095/2010 sowie der Richtlinien 2013/36/EU und (EU) 2019/1937, ABl. 2022 L 150/40.

Bedeutende Änderungen für die Nachhaltigkeitsbewertung des Regulierungsrahmens stellt die Einführung einer **Pflicht zur Erstellung eines Krypto-Whitepapers** für andere Token als vermögenswertreferenzierte Token und E-Geld-Token (Art. 4 Abs. 1 lit. b, 5 Abs. 1 lit. b i. V. m. Art. 6 MiCA-VO), für vermögenswertreferenzierte Token (Art. 17 Abs. 1 lit. a, 18 Abs. 2 lit. k i. V. m. Art. 19 MiCA-VO) und für die Emittenten von E-Geld-Token (Art. 48 Abs. 1 i. V. m. Art. 51 MiCA-VO; vgl. zu einer grundlegenden Darstellung: Zickgraf, 2021a und 2021b). Emittenten von Kryptowerten (öffentliches Angebot) oder die Akteure, die die Zulassung zum Handel von Kryptowerten auf einer Handelsplattform für Kryptowerte beantragen sind verpflichtet ein Whitepaper zu veröffentlichen (vgl. Art. 4 Abs. 1, 5 Abs. 1 MiCA-VO, Zickgraf, 2021a, S. 199). Davon abweichend enthält die MiCA-VO aber auch zahlreiche Ausnahmen (bspw. Art. 4 Abs. 3 MiCA-VO).

Inhaltlich ist den Krypto-Whitepapers gemeinsam, dass Informationen über die wichtigsten nachteiligen Auswirkungen des für die Ausgabe des Kryptowertes verwendeten Konsensmechanismen auf das Klima sowie sonstige entsprechende umweltbezogene nachteilige Auswirkungen enthalten sein müssen (Art. 6 Abs. 1 lit. j, 19 Abs. 1 lit. h, 51 Abs. 1 lit. g MiCA-VO). Für die Bewertungen der Nachhaltigkeitsauswirkungen sollen weitere technische Regelungsstandards und Methoden ausgearbeitet werden (bspw. Art. 6 Abs. 12 MiCA-VO). Die jeweiligen Emittenten haften für fehlerhafte Informationen in den Whitepapers (Art. 15 Abs. 1, 26, 52 MiCA-VO). Außerdem müssen Kryptowertedienstleister Informationen über nachteilige Auswirkungen auf das Klima und andere umweltbezogene Auswirkungen öffentlich zugänglich machen (Art. 66 Abs. 5 MiCA-VO). Weitere über die Whitepaper-Pflicht hinausgehende Informationspflichten sind beispielsweise gem. Art. 11 Abs. 2 MiCA-VO ausgeschlossen. Insofern werden aufgrund der vollharmonisierenden Wirkung der MiCA-VO auch die nationalen Gesetzgeber in ihrer Abweichungskompetenz beschränkt (Zickgraf, 2021a, S. 200).

Ziel der Regelungen ist die Verbesserung des Bewusstseins für mögliche Umweltauswirkungen des Konsensmechanismus (EWG 7, S. 1) und dadurch die Verbreitung von umweltschonenden Konsensmechanismen zu fördern (EWG 7, S. 2). Darüber hinaus bilden die Veröffentlichungen die Grundlage für die administrative Wissensgenerierung im Rahmen des Art. 140 Abs. 2 lit. y MiCA-VO, wonach die Kommission einen Bericht veröffentlichen soll, der unter anderem auch eine "Beschreibung der Technologie/Geschäftsmodelle unter besonderer Berücksichtigung der Umweltauswirkungen und Empfehlungen zu Maßnahmen, um die nachteiligen Auswirkungen auf das Klima und andere umweltbezogene Auswirkungen der auf den Märkten für Kryptowerte eingesetzten Technologien und insbesondere der Konsensmechanismen (...) abzumildern" enthalten soll.

Das Verhältnis des europäischen Rechts zum deutschen Finanzmarktregulierungsrechts bedarf der weiteren Klärung. Aufgrund der Rechtsform der Verordnung, die gem. Art. 288 Abs. 2 AEUV unmittelbare Anwendung in allen Mitgliedsstaaten findet, dürfte die MiCA-VO das jeweilige mitgliedstaatliche Recht **verdrängen** (Siedler, 2021, § 7 Rn. 85). Die Vorschriften über Kryptowerte des KWG wären damit zumindest teilweise obsolet.

Das Finanzmarktregulierungsrecht kann zusammenfassend in zwei Strömungen eingeteilt werden: rechtliche Vorgaben, die den Einsatz von DLT- und Blockchain-basierten Lösungen ermöglichen sollen (z.B. DLT-Pilot-Regime, eWpG) und rechtliche Vorgaben, die eine Einhegung entstandener Lösungen unter das Aufsichtsrecht anstreben (z.B.: KWG). Außerhalb der Regulierung von Kryptowerten ist daneben auch das ZAG als Ermöglichung von E-Geld zu nennen, das aber in klarer Abgrenzung zu den Kryptowerten steht.

## Geldwäsche

Weitere Anpassungen des rechtlichen Rahmens fanden im Bereich der Geldwäscheregulierung statt. So wurde im Gesetz über das Aufspüren von Gewinnen aus schweren Straftaten (Geldwäschegesetz, kurz: GwG) v. 23.06.2017<sup>67</sup> mit § 1 Abs. 29 GwG die Definition von Kryptowerten aus § 1 Abs. 11 S. 1 Nr. 10, S. 4 und 5 KWG übernommen. Die obengenannte Einordnung von Payment Token wirkt folglich auch hier fort.

Gem. § 1 Abs. 30 GwG stellt die Übertragung von Kryptowerten im Sinne dieses Gesetzes jeglicher Transfer von Kryptowerten zwischen natürlichen oder juristischen Personen im Rahmen der Erbringung von Finanzdienstleistungen oder dem Betreiben von Bankgeschäften im Sinne des KWG, der nicht ausschließlich die Kryptoverwaltung iSd § 1 Abs. 1a S. 2 Nr. 6 KWG darstellt. Daneben können Regelungen der Geldtransferrichtlinie<sup>68</sup> einschlägig sein (vgl. Art. 3 Nr. 10, 13 ff.).

Verpflichtete des Geldwäschegesetzes sind gem. § 2 Abs. 1 Nr. 2 GwG i.V.m § 1 Abs. 1a S. 2 Nr. 6 KWG auch Dienstleister, die das **Kryptoverwahrgeschäft** betreiben. Sie sind daher unter Umständen an die Sorgfaltspflichten gem. §§ 10 ff. GwG gebunden. Insbesondere müssen die Verpflichteten die allgemeine Sorgfaltspflicht bei einer Transaktion auch außerhalb von Geschäftsbeziehung erfüllen, wenn es sich bei der Transaktion um die Übertragung von Kryptowerten, die zum Zeitpunkt der Übertragung einen Gegenwert von 1.000 € oder mehr entspricht, handelt. Der Inhalt der allgemeinen Sorgfaltspflicht ergibt sich aus § 10 Abs. 1, 2 GwG.

Darüber hinaus bestehen für die Verpflichteten im Zusammenhang mit Kryptowerten besondere verstärkte Sorgfaltspflichten nach der **Kryptowertetransferverordnung** (KryptoWTransferV). Demnach trifft den Kryptowertedienstleister auf Seiten des Auftraggebers gegenüber dem Kryptowertedienstleister des Empfängers die Pflicht zur sicheren und zeitgleichen Übermittlung der Angaben zum Namen, zur Anschrift und zur Kontonummer (z.B. den öffentlichen Schlüssel) des Auftragsgebers und zum Namen und zur Kontonummer (z.B. öffentlicher Schlüssel) des Begünstigten. Hierfür wird von der Kryptowertetransferverordnung eine lückenlose Rückverfolgbarkeit der Transaktionswege über die jeweiligen Beteiligten angeordnet (vgl. Figura, 2023, § 1 GwG Rn. 97).

Des Weiteren wird durch § 16a Abs. 1 GwG das Verbot der Barzahlung beim Erwerb von Immobilien auf die Bezahlung mit Kryptowerten erstreckt.

## Steuerrecht

Besondere Bedeutung haben Kryptotoken als Anlageobjekte erlangt. Neben den klassisch regulierungsrechtlichen Ansätzen sind daher für die ökonomische Verwendung von Kryptotoken auch die steuerrechtlichen Vorschriften von besonderer Bedeutung. Sie haben nicht unwesentliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit einer Investition in Kryptotoken. Folglich soll vorliegend auch die steuerrechtliche Behandlung von Kryptotoken umrissen werden. Im Vordergrund steht dabei die **ertragssteuerrechtliche Behandlung** von Kryptotoken, die zunehmend als Anlage- und Spekulationsobjekte Verbreitung finden. Eine unbeschränkte deutsche Steuerpflichtigkeit wird vorliegend für die Untersuchung angenommen (zur Steuerpflichtigkeit: Kollmann, 2020, § 17 Rn. 6 ff.).

Eine Verdeutlichung der steuerrechtlichen Einordnung von Kryptotoken wurde durch das **Schreiben des Bundesfinanzministeriums 05/2022** an die obersten Finanzbehörden der

67 BGBl. 2017 I S. 1822, zuletzt geändert durch G. v. 31.05.2023, BGBl. 2023 I S. 140 m. W. v. 02.07.2023.

68 RICHTLINIE (EU) 2023/1113 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 31.05.2023 über die Übermittlung von Angaben bei Geldtransfers und Transfers bestimmter Kryptowerte und zur Änderung der Richtlinie (EU) 2015/849.

Länder zu **“Einzelfragen zur ertragssteuerrechtlichen Behandlung von virtuellen Währungen und von sonstigen Token”** erreicht (BMF, 2022). Das deutsche Steuerrecht folgt einer eigenständigen Einordnung der Kryptotoken als eigenständige Wirtschaftsgüter, die von anderen rechtlichen Bewertungen abweichen kann (Kollmann, 2020, § 17 Rn. 9). Die Einordnung hat für die jeweiligen Kryptotoken im Einzelnen zu erfolgen.

Danach seien **“virtuelle Währungen”** digital dargestellte Werteinheiten, die von keiner Zentralbank oder öffentlicher Stelle emittiert oder garantiert werden. Es handelt sich daher nicht um Währungen im gesetzlichen Sinne, aber um akzeptierte Tauschmittel, die auf elektronischem Wege übertragen, gespeichert und gehandelt werden. Darunter sind mithin die sog. **Payment Token**, die wie Bitcoin, Ether, Litecoin und Ripple als Zahlungsmittel eingesetzt werden (Vgl. Hirzle/Hugendubel, 2022, S. 832), zu fassen. **Payment Token** werden als **“andere Wirtschaftsgüter”** iSd § 23 Abs. 1 Nr. 2 EStG behandelt (BMF, 2022, Rn. 31 ff.). Hiervon zu unterscheiden sind auch im Steuerrecht **“Utility Token”** und **“Security Token”**. Neben der Behandlung der verschiedenen Token, sind auch verschiedene Tätigkeiten im Zusammenhang mit Kryptotoken für die steuerrechtliche Behandlung zu unterscheiden:

#### Steuerlich relevante Tätigkeiten

Der **Handel** mit Kryptotoken umfasst Tätigkeiten wie den An- und Verkauf von Kryptotoken. Die Spanne zwischen dem Anschaffungspreis und dem Verkaufspreis stellen den Veräußerungsgewinn oder –verlust dar.

Im Rahmen der Blockerstellung kann es zu Belohnungen (**Rewards**) für denjenigen kommen, der einen neuen Block anfügt. Die Ausschüttung dieser Belohnung erfolgt in der Regel in Gestalt eines Kryptotokens. Die Verfahren der Block-Erstellung unterscheiden sich in POW und POS. Beim Anhängen eines Blocks im Rahmen des POW spricht man von Mining; im Rahmen des POS hingegen von Forging/Minting (vgl. BMF, 2022, Rn. 7 ff.). Bei der Aufnahme einer Transaktion in einen neu zu erstellenden Block verlangt der Blockerstellende regelmäßig eine **Transaktionsgebühr**.

Von **Staking** spricht man dann, wenn eine Person den Forgern/Validatoren Einheiten für den Stake bereitstellt, ohne selbst als Forger/Validator am Forging beteiligt zu sein (BMF, 2022, Rn. 13).

Daneben werden noch das sog. **Lending**, d.h. die Überlassung von virtuellen Werten gegenüber einer Nutzungsgebühr, **Initial Coin Offerings (ICO)**, d.h. die erstmalige Ausgabe eines Kryptotoken, die Erlangung von Kryptotoken im Wege einer **“Hard Fork”** oder dem sog. **Airdrop**, d.h. der unentgeltlichen Übertragung von Kryptotoken unterschieden.

Aufgrund ihrer vorrangigen Bedeutung soll im Folgenden lediglich die ertragssteuerliche Behandlung von Erträgen aus dem Handel mit Kryptotoken und die Besteuerung sog. Rewards behandelt werden (s. für weitere Ausführungen BMF, 2022, Rn. 64 ff.).

In Betracht kommen verschiedene steuerrechtliche Anknüpfungspunkte, wie die Versteuerung als Einkünfte aus Gewerbebetrieb (§ 15 EStG), als Einkünfte aus nicht-selbstständiger Arbeit (§ 19 EStG), als Einkünfte aus Kapitalvermögen (§ 20 EStG), als Einkünfte aus privaten Veräußerungsgeschäften (§ 22 Nr. 2 EStG) und als sonstige Einkünfte (§ 22 Nr. 3 EStG). Als **Einkünfte aus Gewerbebetrieb** gem. § 15 EStG können Einkünfte versteuert werden, deren Erzielung auf Wiederholung angelegt ist und auf Dauer dazu geeignet sind, aus dieser Tätigkeit einen Gewinn zu erzielen. Die Versteuerung als **Einkünfte aus privaten Veräußerungsgeschäften** setzt eine Einstufung der Kryptotoken als Wirtschaftsgut (§ 23 EStG) voraus. Daneben könnten die Einkünfte auch als **“sonstige Einkünfte”** iSd § 22 Nr. 3 EStG

eingestuft werden. Dies setzt voraus, dass die Einkünfte keiner anderen Einkunftsart zugerechnet werden können (Hirzle/Hugendubel, 2022, S. 833).

Einkünfte, die mittels **Mining** oder **Forging/Staking** erzielt werden, können bei Vorliegen der Voraussetzungen eines Gewerbebetriebs (§ 15 Abs. 2 EStG) als Einkünfte aus Gewerbebetrieb (§ 15 EStG) eingestuft werden. Andernfalls handelt es sich um private Einkünfte, die als Einkünfte sonstiger Art gem. § 22 Nr. 3 EStG zu versteuern sind (BMF, 2022, Rn. 45). Mining bzw. Staking stellen einen **Anschaffungsvorgang**, d.h. den “entgeltlichen Erwerb eines bestehenden oder bereits vorhanden Wirtschaftsguts von Dritten” (BFH Urt. v. 02.05.2000 – IX R 73/98 –, BFHE 192, 435 Orientierungssatz 3) und **kein** Herstellungsvorgang iSd “Schaffens oder Schaffenlassens eines noch nichtexistierenden Wirtschaftsguts” dar (BFH Urt. v. 02.09.1988, III R 53/84, BFHE 154, 413 Orientierungssatz). Grund dafür ist, dass die Kryptotoken, die als Belohnung für das Mining oder Forging (s. Textbox auf der vorherigen Seite) ausgeschüttet werden bereit zuvor bestanden und durch die Ausschüttung lediglich erstmalig in Verkehr gebracht werden (BMF, 2022, Rn. 33). Als Anschaffungskosten gilt der Marktkurs im Zeitpunkt der Anschaffung (BMF, 2022, Rn. 43).

Veräußerungsgewinne aus dem Handel mit **Payment Token** können je nach Art der Tätigkeit entweder als **Einkünfte aus Gewerbebetrieb gem. § 15 Abs. 1, 2 EStG** oder als Einkünfte aus **privaten Veräußerungsgeschäften gem. §§ 22 Nr. 2, 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 EStG** eingestuft werden. Dabei sind die Anschaffungskosten vom Erlös des jeweiligen Verkaufs abzuziehen. Eine Versteuerung von Gewinnen aus der Veräußerung von im Privatvermögen gehaltenen Token nach § 22 Nr. 2 iVm § 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 EStG erfolgt, wenn der Zeitraum zwischen der Anschaffung und der Veräußerung **nicht mehr als ein Jahr** beträgt. Die Veräußerung nach einem Jahr ist damit steuerfrei (Vgl. FG Köln BeckRS 2021, 46851).

Ursprünglich war umstritten, ob die Spekulationsfrist für die steuerfreie Veräußerung von Payment Token auch zehn Jahre gem. § 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 S. 4 EStG betragen kann. Bei einer “Spekulationsfrist” handelt es sich um eine Frist nach deren Verstreichen ein Wirtschaftsgut steuerfrei veräußert werden kann. Vor Ablauf dieser Frist wird die Veräußerung besteuert. Die zehnjährige Spekulationsfrist kommt nur dann in Betracht, wenn die Token verliehen (sog. Lending) oder für das Staking genutzt werden. Denn die Voraussetzung für die Anwendung der zehnjährigen Spekulationsfrist ist, dass mit dem Wirtschaftsgut in einem Kalenderjahr Einkünfte erzielt werden. Das ist bei Payment Token grundsätzlich nicht der Fall, da sich aus der Gestaltung des Payment Token selbst kein Anspruch auf Zinsen oder die Berechtigung an einer Dividende ergibt. Anders ist dies hingegen, wenn die Payment Token verliehen (Lending, Liquidity provision) oder für das Staking eingesetzt werden. Damit sind jedoch auch zusätzliche Risiken verbunden (Verlust oder Teilverlust). Die verlängerte Spekulationsfrist kommt nur in Betracht, wenn mit den Payment Token laufende Einkünfte erzielt werden.

Durch das Schreiben des BMF vom 10.05.2022 (BMF, 2022) wurde jedoch für die Behördenpraxis klargestellt, dass eine Verlängerung der Spekulationsfrist auf zehn Jahre nicht in Betracht komme (vgl. BMF, 2022, Rn. 63; ähnlich bereits Kollmann, 2021, Rn. 23). Eine abschließende gerichtliche Entscheidung steht noch aus. Die behördliche Praxis dürfte sich aber mit dem Schreiben des BMF geklärt haben. Für diese Regelung spricht, dass der historische Grund für die Einführung der verlängerten Veräußerungsfrist gem. § 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 S. 4 EStG die Bekämpfung eines Steuersparmodells war (BT-Drs. 16/4841, S. 58 f.). Der Anwendungsbereich der verlängerten Veräußerungsfrist sollte daher eingeschränkt ausgelegt werden und nur für die Fälle dieses Steuersparmodells Anwendung finden (vgl. Kollmann, 2021, Rn. 26 m. w. N.). Da es sich aber beim Lending oder Staking mit Payment Token nicht um die Fälle des genannten Steuersparmodells handle, seien sie auch nicht erfasst. Diese Auslegung spiegelt sich jedoch im Wortlaut des § 23 EStG nicht wider (Lohmar/Jeuckens, 2022, S. 1840)

und ist daher kritisch zu beurteilen. Unter Umständen wäre eine Anpassung des Gesetzeswortlauts durch den Gesetzgeber nötig (vgl. Himmer/Binder, 2022, S. 275). Es ist folglich auch die umgekehrte Einordnung denkbar, sodass die Spekulationsfrist von 10 Jahren bei Payment Token Anwendung finden würde, die für das Lending oder Staking eingesetzt werden.

Im Übrigen können vom Veräußerungserlös auch die sog. berücksichtigungsfähigen Werbungskosten abgezogen werden. Zu diesen werden Aufwendungen für den Erwerb der erforderlichen Hard- und Software sowie für den **Energieaufwand** gezählt (BMF, 2022, Rn. 47).

Neben den Payment Token sind des Weiteren Utility und Security Token von wesentlicher Bedeutung für das Anlegerverhalten. Bei **Utility Token** tritt neben den Handel mit dem Utility Token noch die Einlösung des in den Token verkörperten Anspruchs hinzu. Während der Veräußerungsgewinn im privaten *Handel* mit Utility Token gem. § 22 Nr. 2 i.V.m § 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 EStG zu behandeln ist (BMF, 2022, Rn. 80), ist die Einlösung des Utility Token unbeachtlich für die ertragssteuerrechtliche Behandlung. Das Bundesfinanzministerium zieht hierzu den Vergleich mit Xetra-Gold<sup>69</sup> Inhaberschuldverschreibungen heran, wonach es an einem entgeltlichen Vorgang fehle, der jedoch Voraussetzung für das Vorliegen eines Veräußerungsgeschäfts gem. § 23 EStG ist. Der Inhaber löst lediglich seinen Anspruch auf Sachleistung ein, ohne dafür mehr zu erhalten als er bereits innehatte (Vgl. BFH Ur. v. 06.02.2018 – IX R 33/17, BFHE 260, 485 Rn. 20).

**Security Token** hingegen sind im Einzelfall zu betrachten und können gem. § 20 EStG als Kapitalvermögen eingeordnet werden (s. bereits Kollmann, 2020, § 17 Rn. 13), unter Umständen aber auch unter §§ 22 Nr. 2, 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 EStG fallen (BMF, 2022, Rn. 81 ff.).

Somit ist die ertragssteuerrechtliche Behandlung der Kryptotoken im Einzelfall zu untersuchen. Besonders hervorzuheben ist bei der ertragssteuerrechtlichen Behandlung von Payment Token der Abzug der Werbungskosten. Da von den Werbungskosten unter anderem auch Kosten für den Stromverbrauch umfasst sein können, können sich daraus Anreize ergeben, die dem nachhaltigen Einsatz von Blockchain-basierten Technologien entgegenstehen. Die ertragssteuerrechtliche Behandlung von Kryptotoken bedarf daher der weiteren Analyse unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten.

### Weitere Regulierungsansätze

Hinsichtlich der Umweltauswirkungen von Blockchains sind weitere Regulierungsinitiativen geplant. So wurde beispielsweise vom Parlament vorgeschlagen Kryptowerte in die **EU-Taxonomie-VO**<sup>70</sup> aufzunehmen (vgl. Oswald, 2022). Bereits zum jetzigen Zeitpunkt wäre eine Berichtspflicht für Unternehmen im Blockchain-Umfeld gem. Art. 8 der Taxonomie-Verordnung oder für Finanzmarktteilnehmer gem. Art. 6 EU-Taxonomie-Verordnung denkbar. Beispielsweise könnten Mining-Aktivitäten zur Gewinnung von Bitcoins eine Wirtschaftstätigkeit darstellen, die entsprechend Art. 3 lit. b i.V.m Art. 17 Abs. 1 lit. a der EU-Taxonomie-Verordnung zu einer erheblichen Beeinträchtigung des Klimaschutzes führen könnte, wenn die Tätigkeit mit erheblichen Treibhausgasemissionen verbunden wäre.

<sup>69</sup> Xetra-Gold ist ein Wertpapier, das wirtschaftlich den Wert des Rohstoffes Gold nachbildet und einen Anspruch auf physische Auslieferung des Goldes verbrieft.

<sup>70</sup> Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18.06.2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088, ABl. L 198/13.

#### 4.4.2.2 Regulatorischer Rahmen: Smart Contracts

Ein weiterer bedeutender Anwendungsfall für Blockchain-Anwendungen stellen Smart Contracts dar. Ihre zivil- und datenschutzrechtliche Einordnung wurde bereits untersucht (vgl. Abschnitte 4.2 und 4.3). Daraus ergeben sich die zentralen rechtlichen Implikationen im Umgang mit Smart Contracts. Je nach Einsatzzweck können diese Implikationen abweichen.

Ein weiterer zentraler Regulierungsansatz für **Smart Contracts** stellt Art. 36 **Data Act** (DA)<sup>71</sup> dar. Der DA-E enthält zwar eine technologieneutrale Definition von "intelligenten Verträgen"<sup>72</sup>, zielt aber in erster Linie auf Blockchain- oder DLT-basierten Smart Contracts ab. Ziel ist die Verbesserung der Interoperabilität zwischen Smart Contracts und ihre Standardisierung (Schmalenberg, 2022, S. 361).

Der Anwendungsbereich des Art. 36 DA ist dabei jedoch auf Smart Contracts beschränkt, die bei einer Anwendung oder zum (gewerblichem) Einsatz in Zusammenhang mit **Vereinbarungen zur gemeinsamen Nutzung von Daten** verwendet werden. Wird ein solcher Smart Contract verwendet, so müssen die Anbieter sicherstellen, dass die wesentlichen Anforderungen des Art. 36 Abs. 1 DA erfüllt sind. Die Anbieter sind verpflichtet eine Konformitätsbewertung durchzuführen und eine Konformitätserklärung abzugeben (Art. 36 Abs. 2, 3 DA). Die Konformitätserklärung begründet die Verantwortung des Anbieters für die Einhaltung der genannten Vorgaben (Art. 36 Abs. 3 DA). Die Folge eines Verstoßes wäre daher eine mögliche zivilrechtliche Haftung (Schmalenberg, 2022, S. 362). Die wesentlichen Anforderungen werden durch technische Normen weiter ausgestaltet (Art. 36 Abs. 4 ff. DA), die sich an den wesentlichen Anforderungen in Art. 36 Abs. 1 DA orientieren müssen. Vorgaben hinsichtlich der **Umweltauswirkungen** der Smart Contracts macht der Data Act nicht (Ahani 2023).

#### 4.4.2.3 Förderung von Blockchain- und DLT-Lösungen

Neben den genannten Regulierungsansätzen strebt die Europäische Union die Förderung der weiteren Verbreitung von Blockchain- und DLT-Lösungen an. Wichtige ökonomische Anreize für den Einsatz von Blockchain-basierten Technologien können sich dabei aus europäischen Förderprogrammen ergeben. Zwar handelt es sich bei Förderprogrammen nicht um Regulierungsrecht im eigentlichen Sinne. Dennoch können daraus Anreize für nachhaltige Blockchain-Anwendungen folgen, weshalb vorliegend einige ausgewählten europäischen Förderprogramme in den Analyserahmen einbezogen werden sollen.

Zentrales Förderprogramm für die Unterstützung digitaler Technologien stellt das europäische Förderprogramm "**Digitales Europa**" dar.<sup>73</sup> Das allgemeine Ziel des Förderprogramms ist gem. Art. 3 Abs. 1 der Verordnung die Unterstützung des digitalen Wandels und die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Digitalwirtschaft durch Stärkung der europäischen Kapazitäten in Schlüsseltechnologien und der Ermöglichung des Zugangs zu diesen Technologien. Hierzu wurden gem. Art. 3 Abs. 2 der Verordnung fünf spezifische Ziele niedergelegt, die in den folgenden Artikeln weiter ausgestaltet wurden (Hochleistungsrechnen; Künstliche Intelligenz; Cybersicherheit und Vertrauen; Fortgeschrittene digitale Kompetenzen;

71 VERORDNUNG (EU) 2023/2854 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 13.12.2023 über harmonisierte Vorschriften für einen fairen Datenzugang und eine faire Datennutzung sowie zur Änderung der Verordnung (EU) 2017/2394 und der Richtlinie (EU) 2020/1828.

72 Art. 2 Nr. 16 DA-E: „'intelligenter Vertrag' [ist] ein in einem elektronischen Vorgangsregistersystem (electronic ledger system) gespeichertes Computerprogramm, bei dem das Ergebnis der Programmausführung in dem elektronischen Vorgangsregister aufgezeichnet wird“.

73 VERORDNUNG (EU) 2021/694 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES v. 29.04.2021 zur Aufstellung des Programms „Digitales Europa“ und zur Aufhebung des Beschlusses (EU) 2015/2240, ABl. 2021, L 166/1.

Einführung und optimale Nutzung digitaler Kapazitäten und Interoperabilität). Das Förderprogramm legt eine Finanzausstattung für den Zeitraum von 2021-2027 fest.

Teil des Programms "Digitales Europa" ist gem. Erwägungsgrund 10 unter anderem die Förderung der Distributed-Ledger-Technologien (z. B. Blockchain), wobei gleichzeitig ein hohes Datenschutzniveau, Grundrechte und ethische Standards gewahrt werden sollen.

Die Förderung der Einführung von fortgeschrittenen digitalen Technologien wie die Distributed-Ledger-Technologie (z.B. Blockchain) im öffentlichen Sektor und der Industrie ist gem. Art. 8 Abs. 1 lit. f der Verordnung Teil des **spezifischen Ziels 5 (Einführung und optimale Nutzung digitaler Kapazitäten und Interoperabilität)**. Daneben soll auch die weitere Verwirklichung vertrauenswürdigen Austauschs von Daten durch die Verwendung von DLT gefördert werden (Art. 8 Abs. 1 lit. i). Die Förderung kann gem. Art. 14 Abs. 2 der Verordnung durch Aufträge, Finanzhilfen oder Preisgelder erfolgen. Förderfähig sind gem. Art. 17 Abs. 1 alle Maßnahmen, die die Ziele der Art. 4-8 der Verordnung erreichen können. Die weiteren Förderkriterien werden im Arbeitsprogramm der Kommission niedergelegt. Zu berücksichtigen bei einer Förderung sind gem. Art. 20 Abs. 2 lit. b der Verordnung auch die erwarteten Auswirkungen der Projekte auf die Wirtschaft, Gesellschaft, Umwelt und das Klima.

Die Kommission führt hierzu im Annex zur Durchführungsentscheidung für das Programm Digitales Europa für 2021-2023<sup>74</sup> aus, dass als Teil der Evaluationskriterien auch die **Auswirkungen der Projekte auf die Nachhaltigkeitsziele** der Union im Rahmen des europäischen Green Deals berücksichtigt werden sollen. Sie sind Teil des Evaluationskriteriums "Impact" (vgl. EU-Kommission 2023a, S. 5 f.; EU-Kommission 2021, S. 19).

Neben der Förderung durch das Programm "Digitales Europa" kommen gem. Art. 13 Abs. 1 i.V.m. Anhang III der Verordnung auch Synergien und gemeinsame Förderungen durch andere Programme in Betracht, wie beispielsweise des Programms "**Horizont Europa**"<sup>75</sup> zur Förderung von Forschung und Innovation in Europa und zur Entwicklung des Europäischen Forschungsraums (EFR). Des Weiteren kommt eine Förderung für Distributed-Ledger-Technologien auch durch das Förderprogramm "**InvestEU**"<sup>76</sup> in Betracht (vgl. Anhang III Ziff. 4 der Verordnung "Digitales Europa").

Förderfähige Maßnahmen müssen gem. Art. 14 Abs. 1 lit. b der Verordnung "InvestEU" in Anhang II genannt werden. Dort wird unter anderem auch in Ziff. 2 die Entwicklung, die Verbreitung und der Ausbau digitaler Technologien und Dienste genannt, die zum Ziel des Programms "Digitales Europa" beitragen. Davon sind auch Distributed-Ledger-Technologien und Blockchain erfasst.

Gem. Art. 8 Abs. 5 der Verordnung "InvestEU" werden Finanzierungen und Investitionen auf **ökologische, klimabezogene oder soziale Auswirkungen geprüft**. Bestehen derartige Auswirkungen, so wird die klimabezogene, ökologische und soziale Nachhaltigkeit geprüft, um möglichst geringe negative und möglichst große positive Auswirkungen auf Klima, Umwelt und Soziales sicherzustellen. Die jeweiligen Projektträger müssen die Auswirkungen bei dem Antrag auf Finanzierung darlegen. Art. 8 Abs. 5 stellt ausdrücklich fest, dass "Projekte, die nicht mit den Klimaschutzzielen vereinbar sind," für eine Förderung nicht in Betracht kommen. Zur Bewertung der Anträge auf Inanspruchnahme der EU-Garantie im Rahmen des Programms

---

74 C (2021) 7911 final v. 10.11.2021.

75 VERORDNUNG (EU) 2021/695 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES v. 28.04.2021 zur Einrichtung von „Horizont Europa“, dem Rahmenprogramm für Forschung und Innovation, sowie über dessen Regeln für die Beteiligung und die Verbreitung der Ergebnisse und zur Aufhebung der Verordnungen (EU) Nr. 1290/2013 und (EU) Nr. 1291/2013, ABl. 2021, L 170/1.

76 VERORDNUNG (EU) 2021/523 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 24. März 2021 zur Einrichtung des Programms „InvestEU“ und zur Änderung der Verordnung (EU) 2015/1017, ABl. 2021, L 107/30.

“InvestEU” wurde eine delegierte Verordnung<sup>77</sup> erlassen, die Bewertungskriterien für diese Anträge enthält.

Die Darstellung der ausgewählten Förderprogramme zeigt, dass Investitionen in Distributed-Ledger-Technologien und Blockchain ein nicht unwesentlicher Bestandteil europäischer Förderprogramme darstellen. Gleichzeitig ist jedoch erkennbar, dass die Förderprogramme einen wesentlichen Fokus auf Projekte legen, die Nachhaltigkeitsziele berücksichtigen und Auswirkungen auf das Klima und die Umwelt minimieren (vgl. bspw. Art. 8 Abs. 5 S. 2, 5 Invest-EU-VO). Projekte, die nicht mit den Klimaschutzziele vereinbar sind, können gar von der Förderung ausgeschlossen sein (vgl. Art. 8 Abs. 5 S. 5 Invest-EU-VO). Die EU-Förderpolitik ist daher im Einklang mit dem auch von der Blockchain-Strategie der Bundesregierung geäußerten Ziel, dass staatlich geförderte Projekte die nachhaltigkeitsbezogenen Anforderungen zu einem wesentlichen Bewertungskriterium machen sollen (Bundesregierung 2019, S. 10).

Neben der finanziellen Förderung strebt die EU-Kommission außerdem die Schaffung von Standards (Soft Law) an, um das Vertrauen in Blockchain-basierte Lösungen zu erhöhen. Auffällig dabei ist, dass die EU-Kommission bei der Aufzählung von relevanten Normierungsthemen Nachhaltigkeitskriterien und die Verminderung des Energieaufwands nicht nennt (EU-Kommission 2023b).

#### 4.4.3 Identifikation von Anreizen durch den bestehenden regulatorischen Rahmen

Der dargestellte regulatorische Rahmen beeinflusst in vielfältiger Weise die weitere Verbreitung von Blockchain-basierten Anwendungen, ohne dass in jedem Fall nachhaltigkeitsbezogene Auswirkungen gegeben sind. Im Groben lassen sich zwei Tendenzen identifizieren: Erstens die Förderung der weiteren Verbreitung von Blockchain-Anwendungen durch die Schaffung von Rechtssicherheit (z.B. DLT-Pilot-Regime, Regelungen für Smart Contract in Art. 30 DA-E, Förderprogramme) und zweitens die rechtliche Beschränkung von Risiken, die mit Blockchain assoziiert werden (z.B. MiCA-VO, Geldwäscheregulierung). Die Darstellung des regulatorischen Rahmens hat gezeigt, dass lediglich einige wenige Vorschriften überhaupt die klima- und umweltbezogenen Auswirkungen von Blockchain berücksichtigen (vgl. insoweit ausdrücklich: Whitepaper-Pflicht iSd MiCA-VO und Genehmigungsvoraussetzungen in Förderprogrammen).

Sofern der regulatorische Rahmen keine umweltbezogenen Auswirkungen in den Blick nimmt, erscheinen die Vorschriften für die nachfolgende Analyse vernachlässigbar. Es ist zwar nicht ausgeschlossen, dass auch mit diesen Rechtsnormen nachhaltigkeitsbezogene Anreize für den Umgang mit Blockchain gesetzt werden. Diese dürften jedoch lediglich mittelbar und als entfernte Folge auftreten. Derartige indirekte Auswirkungen können jedoch mit allen Normen verbunden sein, ohne dass die Analyse spezifische Erkenntnisse für einen Rechtsrahmen hervorbringen könnte, der Anreize für eine nachhaltigere Nutzung der Technologie setzen soll. Die Analyse soll sich daher im Folgenden auf die Vorschriften zu **Informationspflichten im Whitepaper**, der Abzug von Energiekosten als Werbungskosten bei der **ertragssteuerrechtlichen Behandlung** von Payment Token (§§ 22 Nr. 2, 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 EStG bzw. § 15 EStG), die **einjährige Spekulationsfrist** für Payment Token (§ 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 S. 4 EStG) und die **Kriterien für die Förderfähigkeit einer Blockchain-bezogenen Maßnahme bei EU-Förderprogrammen** beschränken.

Dabei sollen aus den rechtlichen Vorgaben Anreize identifiziert werden, die zu einem Verhalten mit positiven oder negativen Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit dem Einsatz von Blockchain führen. Die Bewertung der Umweltauswirkung erfolgt dabei unter Beachtung

<sup>77</sup> Delegierte Verordnung (EU) 2021/1078 der Kommission v. 14.04.2021 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2021/523 des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Festlegung der Investitionsleitlinien für den InvestEU-Fonds.

unterschiedlicher Nachhaltigkeitsaspekte (Abschnitt 4.4.1). Erstens wird der Rohstoffaufwand, d.h. die Inanspruchnahme von Mineralien und fossilen Rohstoffen berücksichtigt. Zweitens werden Verhaltensweisen identifiziert, die Auswirkungen auf den Energieaufwand haben können. Als dritter Nachhaltigkeitsaspekt werden die erwarteten Treibhausgasemissionen in die Bewertungen mit einbezogen. Dieser Aspekt steht dabei in einem engen Zusammenhang zu dem erwarteten Energieaufwand einer Verhaltensweise.

Im Rahmen der Analyse werden solche Umweltwirkungen als positiv bewertet, wenn entweder der Rohstoffaufwand, der Energieaufwand oder die damit verbundenen Treibhausgasemissionen verringert werden können. Als negativ hingegen sind solche Umweltauswirkungen zu bewerten, bei denen der Rohstoffaufwand, der Energieaufwand oder die Treibhausgasemissionen intensiviert werden.

Die Analyse beginnt mit der Darlegung der rechtlichen Vorgaben. Danach sollen die ökonomischen Anreize aus diesen rechtlichen Vorgaben herausgearbeitet werden. Grundlage der Betrachtung bildet hierfür das Verhalten, das von rationalen Akteuren erwartet werden kann. Es wird danach gefragt, ob sich das Verhalten des Akteurs durch die Vorschrift verändert gegenüber einer Situation, in der die Vorschrift nicht gegeben wäre. Ein rechtskonformes Verhalten wird unterstellt. Ergeben sich aus den rechtlichen Vorgaben zu erwartende Verhaltensänderungen, so sollen diese auf positive oder negative Umweltauswirkungen bewertet werden.

Bei der Analyse der Anreize des regulatorischen Rahmens muss beachtet werden, dass die Auswirkungen auf Akteure begrenzt sind, die der jeweiligen Rechtsordnung unterliegen. Die Auswirkungen sind daher auf Akteure, die der europäischen bzw. deutschen Rechtsordnung unterfallen begrenzt. Insbesondere bei Anreizen, die sich aus deutschen Rechtsnormen ergeben, dürften die tatsächlichen Auswirkungen auf das internationale Blockchain-Marktgeschehen daher gering sein. Der deutsche Anteil an den Marktaktivitäten ist gering, sodass Auswirkungen nur von untergeordneter Bedeutung sein werden.

#### 4.4.3.1 Whitepaper-Pflicht in der MiCA-VO

Ein Anreiz zu nachhaltigem Verhalten kann sich aus der Pflicht zur Offenlegung von Umweltauswirkungen in Kryptowerte-Whitepapern gem. Art. 6 Abs. 1 lit. j, 19 Abs. 1 lit. h, 51 Abs. 1 lit. g MiCA-VO und der Pflicht zur Offenlegung von Umweltauswirkungen durch die Anbieter von Kryptowerte-Dienstleistungen (Art. 66 Abs. 5 MiCA-VO) ergeben.

Die MiCA-VO gilt sowohl für **Payment Token**, als auch für **Utility Token** (Maume/Siadat 2023, S. 1169; Zickgraf 2021a, S. 198 f., s. Abschnitt 4.4.2). Stablecoins, die grundsätzlich eine Unterform der Payment Token darstellen (Zickgraf, 2021a, S. 199), werden durch die MiCA-VO einer gesonderten, intensiveren Regulierung unterzogen (Titel 3 und 4, vgl. Zickgraf, 2021a, S. 199; Maume/Siadat, 2023, S. 1169). Damit werden bedeutende Anteile der am Kapitalmarkt verfügbaren Anlagemöglichkeiten in Kryptowerte von der MiCA-VO erfasst. Die konkreten Anforderungen an die verschiedenen Arten von Kryptowerten variieren. Die Art. 4 ff. der MiCA-VO gelten in Folge einer Negativabgrenzung nur für Kryptowerte, die nicht vermögenswertreferenzierte Token oder E-Geld sind. Die Art. 16 ff. MiCA-VO hingegen erfassen nur vermögenswertreferenzierte Token (sog. Stablecoins, vgl. Zickgraf, 2021a, S. 199) und Art. 48 ff. MiCA-VO nur E-Geld-Token. Art. 59 ff. MiCA-VO trifft außerdem Regelungen für die Zulassung und Ausübung der Tätigkeit von Anbietern von Kryptowerte-Dienstleistungen.

Infolgedessen fallen auch die Adressaten der Verpflichtung ein Kryptowerte-Whitepaper zu erstellen je nach betroffenem Kryptowert auseinander. Für **andere Kryptowerte als vermögenswertreferenzierte Token oder E-Geld-Token** sind gem. Art. 4 Abs. 1 die Personen,

die einen solchen Kryptowert öffentlichen anbieten wollen, und die Personen, die einen Antrag auf Zulassung zum Handel auf Handelsplattform stellen (Art. 5 Abs. 1 lit. b MiCA-VO), zur Erstellung eines Kryptowerte-Whitepapers verpflichtet. Davon sind in Art. 4 Abs. 2, 3 MiCA-VO Ausnahmen vorgesehen. Zu nennen ist insbesondere die Ausnahme für öffentliche Angebote, die sich ausschließlich an qualifizierte Anleger iSd Art. 3 Abs. 1 Nr. 30 MiCA-VO iVm Anlage II Abschnitt 1 Nr. 1-4 der RL 2014/65/EU richten (Art. 4 Abs. 2 lit. c MiCA-VO) und für öffentliche Angebote bei denen der Kryptowert als Gegenleistung für die Pflege des Distributed Ledgers oder die Validierung von Transaktionen geschürft wird (Art. 4 Abs. 3 lit. b MiCA-VO).

Neben den öffentlichen Anbietern können auch die Personen, die die Zulassung des Kryptowertes zum Handel beantragen, zur Erstellung eines Whitepapers verpflichtet sein. Für die Erstellung eines Kryptowerte-Whitepapers im Zusammenhang mit der Beantragung zum Handel sind die Ausnahmen in Art. 5 Abs. 4 MiCA-VO geregelt. Danach muss die Person keine Kryptowerte-Whitepaper erstellen, wenn der Kryptowert bereits auf einer anderen Plattform für Kryptowerte in der Union zugelassen ist und ein Kryptowerte-Whitepaper bereits erstellt ist und aktualisiert wird und die verantwortliche Person der Verwendung schriftlich zustimmt.

Zwar sollen die Regelungen in Titel II MiCA-VO für Kryptowerte ohne identifizierbaren Emittenten, wie beispielsweise Bitcoin, nicht anwendbar sein (Erwgr. 22 S. 4). Dies ändert aber nichts an der Anwendbarkeit der Normen auf Anbieter von Kryptowerte-Dienstleistungen für solche Kryptowerte anbieten (Erwgr. 22 S. 5). Sie sind gem. Art. 65 Abs. 5 MiCA-VO auch zur Bereitstellung von Informationen über die wichtigsten nachteiligen Klimaauswirkungen.

Der Inhalt des Kryptowerte-Whitepapers für andere Kryptowerte als vermögenswertereferenzierte Token oder E-Geld-Token ergibt sich aus Art. 6 iVm Anhang I MiCA-VO.

Ähnliche Verpflichtungen zur Erstellung eines Kryptowerte-Whitepapers treffen gem. Art. 17 Abs. 1 lit. a MiCA-VO auch Kreditinstitute bzw. gem. Art. 18 Abs. 2 lit. k MiCA-VO juristische Personen oder andere Unternehmen, die das öffentliche Angebot eines **vermögenswertereferenzierten Tokens** beabsichtigen oder die Zulassung eines vermögenswertereferenzierten Tokens zum Handel beantragen. Der Inhalt des Kryptowerte-Whitepapers ergibt sich für diese Kryptowerte aus Art. 19 iVm Anhang II MiCA-VO.

Personen, die **E-Geld-Token** in der Union öffentlich anbieten oder die Zulassung von E-Geld-Token zum Handel beantragen müssen gem. Art. 48 Abs. 1 lit. b MiCA-VO ein Kryptowerte-Whitepaper veröffentlichen. Der Inhalt des Kryptowerte-Whitepapers ergibt sich aus Art. 51 iVm Anhang III MiCA-VO.

Den Vorschriften über den **Inhalt des Kryptowerte-Whitepapers** ist für alle Kryptowerte **gemeinsam**, dass die Kryptowerte-Whitepaper Informationen *“über die wichtigsten nachteiligen Auswirkungen des für die Ausgabe des Kryptowerts [vermögenswertereferenzierten Token/E-Geld-Token] verwendeten Konsensmechanismus auf das Klima sowie sonstige entsprechende umweltbezogene nachteilige Auswirkungen”* enthalten sollen (Vgl. Art. 6 Abs. 1 lit. j, 19 Abs. 1 lit. h, 51 Abs. 1 lit. g MiCA-VO). Die ESMA soll *“in Zusammenarbeit mit der EBA”* jeweils *“Entwürfe technischer Regulierungsstandards für den Inhalt, die Methoden und die Darstellung”* der genannten Informationen ausarbeiten. Hierzu sollen *“die verschiedenen Arten von Konsensmechanismen, die bei der Validierung von Transaktionen mit Kryptowerten zum Einsatz kommen, deren Anreizstrukturen und die Nutzung von Energie, Energie aus erneuerbaren Quellen und natürlichen Ressourcen, die Erzeugung von Abfällen und Treibhausgasemissionen”* berücksichtigt werden. Diese Regulierungsstandards kann die Kommission dann als Ergänzung der MiCA-VO gem. Artikeln 10 bis 14 der Verordnung (EU) Nr. 1095/2010 erlassen (Art. 6 Abs. 12, 19 Abs. 11, 51 Abs. 15 MiCA-VO). Eine vergleichbare Pflicht trifft außerdem auch die

Anbieter von Kryptowerte-Dienstleistungen (Art. 66 Abs. 5 MiCA-VO). Sie müssen die Informationen für die Kryptowerte, in Bezug auf die sie Dienstleistungen erbringen, auf ihrer Website an gut erkennbarer Stelle öffentlich zugänglich machen.

Die **Anforderungen an die Informationen über Klima- und Umweltauswirkungen** in den Kryptowerte-Whitepaper für die erfassten Kryptowerte sind dem Wortlaut nach **weitgehend identisch**. Aus den Informationspflichten ergibt sich eine umfassende Transparenz über nachteilige Umwelt- und Klimaauswirkungen durch die den Kryptowerten zugrundeliegenden Konsensmechanismen. Ziel der Regelungen ist die Verbesserung des Bewusstseins für mögliche Umweltauswirkungen des Konsensmechanismus (EWG 7, S. 1) und dadurch die Förderung der Verbreitung von umweltschonenden Konsensmechanismen (EWG 7, S. 2). Darüber hinaus bilden die Veröffentlichungen auch die Grundlage für die administrative Wissensgenerierung im Rahmen des Art. 140 Abs. 2 lit. y MiCA-VO, wonach die Kommission einen Bericht veröffentlichen soll, der unter anderem auch eine *“Beschreibung der Technologie/Geschäftsmodelle unter besonderer Berücksichtigung der Umweltauswirkungen und Empfehlungen zu Maßnahmen, um die nachteiligen Auswirkungen auf das Klima und andere umweltbezogene Auswirkungen der auf den Märkten für Kryptowerte eingesetzten Technologien und insbesondere der Konsensmechanismen (...) abzumildern”* enthalten soll.

Hinsichtlich der ökonomischen Anreize, die mit den Informationspflichten verbunden sind, lassen sich **zwei Adressatengruppen** der Anreizwirkung unterscheiden: Unmittelbare Adressaten sind die Anleger/Kunden, die in Kryptowerte investieren wollen. Whitepaper-Pflichten sind aus dem Wertpapierrecht als Prospektpflichten bekannt und dienen in erster Linie dem Abbau von Informationsasymmetrien zwischen Emittenten und Anlegerinnen (Zickgraf, 2021a, S. 197). Mittelbar können die Informationspflichten aber auch Anreizwirkungen gegenüber den Anbietern von Kryptowerten und Personen, die den Handel mit Kryptowerten beantragen wollen, zeitigen.

Betrachtet man zuerst die Anlegerinnen, die in Kryptowerte investieren wollen, so ist der Adressatenkreis vorliegend weiter einzuschränken. Die Kryptowerte-Whitepaper richten sich, wie aus der Ausnahme für Angebote, die sich an qualifizierte Anleger richten (Art. 4 Abs. 2 lit. c MiCA-VO), geschlossen werden kann, in erster Linie an **Privatpersonen**. Qualifizierte Anlegerinnen, d.h. im Wesentlichen institutionelle Anlegerinnen, sollen daher bei der vorliegenden Betrachtung unberücksichtigt bleiben. Es sollen darüber hinaus nur solche Szenarien betrachtet werden in denen die Privatperson in Kryptowerte als Geldanlage in Form des Handels mit Kryptowerten investieren will. Andere denkbare Fälle, wie bspw. die Beteiligung der Privatperson an einem Blockchain-Netzwerk als Miner sollen hier unberücksichtigt bleiben.

Die Entscheidung für ein Anlageprodukt ist vielfältig. Gemäß der neoklassischen Finanzmarkttheorie stehen risikogewichtete Gewinnaussichten und Diversifikationsüberlegungen im Vordergrund. Darüber hinaus lassen sich bei Investitionen in Kryptowerte auch weitere Faktoren beobachten, die nicht auf die ursprüngliche neoklassischen Finanzmarkttheorie zurückzuführen sind. Es handelt sich hierbei um Aspekte wie Technikaffinität, vermeintliche Pseudonymität, Misstrauen in das traditionelle Finanzsystem und die Unabhängigkeit von zentralen Institutionen eine Rolle bei der Anlageentscheidung.

Die Transparenzpflichten durch Kryptowerte-Whitepaper sorgen dafür, dass die Privatanlegenden die konkreten Klima- und Umweltauswirkungen in ihren Anlageentscheidungen berücksichtigen können. In das Kryptowerte-Whitepaper sind Informationen aufzunehmen *“über die wichtigsten **nachteiligen** Auswirkungen des für die*

*Ausgabe des Kryptowertes verwendeten Konsensmechanismus auf das Klima sowie sonstige entsprechende nachteilige Auswirkungen“ (vgl. Art. 6 Abs. 1 lit. j MiCA-VO).*

Im Hinblick auf die Ergebnisse aus Arbeitspaket 1 (s. Kapitel 3) ist anzunehmen, dass insbesondere bei Kryptowerten, die auf dem POW-Konsensmechanismus basieren, starke nachteilige Umweltauswirkungen gegeben sind und in dem Kryptowerte-Whitepaper transparent gemacht werden müssten. Bei Kryptowerten auf der Grundlage des POS-Konsensmechanismus bestehen zwar negative Umweltauswirkungen, diese sind jedoch im Vergleich zum POW-Konsensmechanismus deutlich geringer.

Betrachtet man **mögliche Verhaltensweise der Anlegerinnen** in Folge der Veröffentlichung der Kryptowerte-Whitepaper, so sind, vereinfacht gesagt, vier mögliche Verhaltensweisen zu unterscheiden:

- ▶ Die Anlegenden entscheiden sich gegen eine Investition (Variante 1),
- ▶ die Anlegenden investieren in ein anderes Anlageprodukt ohne Bezug zu Blockchain (z.B. Aktien) (Variante 2),
- ▶ die Anlegenden investiert in einen Kryptowert ohne bzw. mit geringeren nachteiligen Umweltauswirkungen (Variante 3), oder
- ▶ die Anlegenden investiert in den Kryptowert ohne Rücksicht auf nachteilige Umweltauswirkungen (Variante 4).

Die Entscheidung für eine Verhaltensweise ist von den persönlichen Präferenzen der Anlegenden abhängig. Aus der Verpflichtung zur Erstellung eines Kryptowerte-Whitepapers können sich aufgrund der verbesserten Transparenz aber Auswirkungen auf das Verhalten der Anlegenden hinsichtlich Variante 4 ergeben. Prognostiziert man den das Investitionsverhalten der Anlegenden unter **rein monetären Aspekten**, so ergeben sich aus den transparent gemachten Informationen über Umweltauswirkungen wohl keine Anreize für eine Verhaltensänderung. Die Privatanlegenden treffen keine unmittelbaren wirtschaftlichen Nachteile aus einer Investition in Produkte mit negativen Klima- und Umweltauswirkungen. Es entstehen ihnen keine direkten Kosten. Denkbar sind indirekte Kosten, insb. im Zusammenhang mit negativen Umweltwirkungen. Diese betreffen jedoch die Allgemeinheit und nicht die Anlegenden direkt. Die Anlegenden werden aus rein monetärer Sicht diese Kosten deshalb nur minimal oder wahrscheinlicher gar nicht berücksichtigen. Die Informationen über Klima- und Umweltauswirkungen spielen daher aus **monetären Gründen** auf den ersten Blick keine Rolle bei der Anlageentscheidung von Privatanlegenden, solange sich daraus keine Kosten oder Gewinnerwartungen ergeben.

Zieht man nun **nicht nur monetäre Aspekte** in die Anlageentscheidung der Privatanlegenden ein, so kann sich ein anderes Bild ergeben. An Bedeutung gewinnen vor dem Hintergrund zunehmend auch sog. ESG-Kriterien bei der Auswahl von Anlageprodukten durch Privatanlegende (vgl. Allianz Global Investors, 2019). Diese Privatanlegenden möchten sicherstellen, dass ihre Investitionen keine oder keine starken negative Auswirkungen auf die Umwelt haben. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen Drăgnoiu et al., die herausfanden, dass Anlegende, die im Vorfeld der Anlageentscheidung über den Energieaufwand von Kryptowerten aufgeklärt wurden, sich eher für einen energieeffizienteren Kryptowert entscheiden als für energieintensivere Produkte (Drăgnoiu et al., 2023).

In diesem Kontext soll durch die Bereitstellung von Informationen den Privatanlegenden die Umweltauswirkungen, also die “wahren“ Kosten, nahegelegt und dadurch ihr Verhalten beeinflusst werden (vgl. Schlacke et al., 2015, S. 61; Sacksofsky, 2022, Rn. 75). Neben monetären

Aspekten, die grundsätzlich keine Verhaltensänderung erforderlich machen würden, sollen auch andere verhaltensbeeinflussende Gründe in die Entscheidung der Privatanlegenden einfließen. Vor diesem Hintergrund können die Informationen über die nachteilige Umweltauswirkungen der Konsensmechanismen auf denen die Kryptowerte aufbauen durchaus das Verhalten der Privatanlegenden beeinflussen.

Aus der einheitlichen Darstellung der Umweltinformationen in den Kryptowerte-Whitepapern ergibt sich darüber hinaus eine Vergleichbarkeit der einzelnen Produkte untereinander. Privatanlegende werden nun in die Lage versetzt die nachteiligen Auswirkungen der einzelnen Kryptowerte zu vergleichen. Dadurch werden Kryptowerte mit weniger nachteiligen Umweltauswirkungen gegenüber Kryptowerten mit nachteiligeren Umweltauswirkungen attraktiver. Die Privatanlegenden werden sich womöglich unter diesen Bedingungen eher gegen die Verhaltensweise **Variante 4** und für eine andere Verhaltensweise entscheiden. Es entstehen Anreize für eine Entscheidung der Privatanlegenden für nachhaltigere Kryptowerte.

Als **zweite Adressatengruppe** kommen mittelbar die **Personen in Betracht, die Kryptowerte öffentlich anbieten oder für einen Kryptowert die Zulassung zum Handel in der Union beantragen** wollen und die **Anbietenden von Kryptowerte-Dienstleistungen**. Sie sollen im Folgenden für die Analyse der Anreize im Hinblick auf die Whitepaper-Pflicht zur Vereinfachung umfassend als **gewerbliche Akteure** bezeichnet werden. Sie sind für die Bereitstellung der Informationen über die Umweltauswirkungen verantwortlich.

Die gewerblich Anbietenden verdienen an dem öffentlichen Angebot der Kryptowerte und an dem Handel mit den Kryptowerten Geld. Ihre Geschäftsmodelle hängen von einer Nachfrage der Kryptowerte im Markt ab. Mit gesteigener Nachfrage nach den Kryptowerten steigen in der Regel auch ihre potenziellen Einnahmen, da sie bspw. als Anbietende von Kryptowerte-Dienstleistungen Entgelte für die Verwahrung und Verwaltung der Kryptowerte verlangen können. Als gewerbliche Akteure ist ihr Handeln in erster Linie durch ökonomische Rationalitäten geprägt. Die ergänzenden Rationalitäten, die für Privatanlegende eingeführt wurden, greifen hier nicht. Folglich fließen lediglich ökonomische Kriterien in die Ermittlung etwaiger Anreize durch die Informationspflichten ein.

Gewerbliche Akteure können darüber entscheiden, für welche Kryptowerte sie die Zulassung zum Handel beantragen wollen, wie der Kryptowert gestaltet sein soll, den sie öffentlich anbieten oder für welchen Kryptowert sie bestimmte Dienstleistungen anbieten. Die Entscheidung wird im Einzelnen von den Gewinnerwartungen, die mit dem jeweiligen Kryptowert verbunden sind, abhängen. Erwarten die gewerblichen Akteure für einen Kryptowert eine gesteigerte Nachfrage, so werden sie sich für eine unternehmerische Betätigung im Zusammenhang mit diesem Kryptowert entscheiden. Es wird angenommen, dass sich die gewerblichen Anbieter für unternehmerische Betätigungen mit Kryptowerten mit nachteiligen und nicht nachteiligen Umweltauswirkungen gleichermaßen entscheiden können.

**Unmittelbar** monetäre Anreize ergeben sich **nicht** aus den Whitepaper-Pflichten für das Verhalten der gewerblichen Akteure. Es können sich aber **mittelbare** Auswirkungen auf die Stellung der Anbietenden im Markt ergeben. Unterstellt man, dass die Privatanlegenden in Folge der Informationen in den Kryptowerte-Whitepaper umweltschonendere Kryptowerte bevorzugen werden, so kann sich daraus eine **Verringerung der Nachfrage** im Hinblick auf klima- und umweltschädliche Kryptowerte ergeben. Die Privatanlegenden werden sich stattdessen für umweltschonendere Produkte entscheiden. Die Folge ist eine **Nachfrageverlagerung** auf diese Kryptowerte.

Folglich steigt auch das Interesse von gewerblichen Akteuren umweltschonendere Kryptowerte anzubieten. Denn mit gestiegener Nachfrage von Privatanlegenden sind auch höhere Einnahmen für die gewerblich Anbietenden zu erwarten.

Darüber hinaus kann sich mit der verbesserten Transparenz die öffentliche Wahrnehmung in Bezug auf gewerbliche Akteure ändern, die mit klima- und umweltschädliche Kryptowerte verbunden werden. Unternehmen, die klima- und umweltschädliche Produkte anbieten, erleiden womöglich einen gewissen **Image-Verlust** in der öffentlichen Wahrnehmung, der sich auf die Stellung der Unternehmen im Markt auswirken kann.

Es ist zu erwarten, dass diese Veränderungen im Markt wiederum Druck auf die Anbietenden von klima- und umweltschädlichen Kryptowerte erzeugen werden, ihre **Produkte auf umweltverträglichere Lösungen umzustellen, um Wettbewerbsnachteile zu verringern**. Zwar liegt diese Entscheidung nicht unmittelbar bei den regulierten Dienstleistenden und Personen, die die Zulassung zum Handel beantragen. Denn eine Umstellung des Konsensmechanismus kann technisch betrachtet nur durch, die Miner erreicht werden. Dies spielt aber ökonomisch keine Rolle so lange weiterhin eine Nachfrage nach POW-Blockchain besteht. Mit der erwarteten verringerten Nachfrage durch Privatanlegende und der Verlagerung des Fokus der gewerblichen Akteure auf umweltschonendere Produkte wohl auch eine Verringerung der Marktkapitalisierung zu erwarten. Durch den gesunkenen Preis der Kryptowerte mit negativen Umweltauswirkungen nimmt aber gleichzeitig auch der Anreiz für Miner ab, sich beim Mining solcher Kryptowerte zu beteiligen, da der Wert der Rewards abnimmt, den sie für ihre Aktivitäten erhalten. Daher steigt der Druck auf die Miner, aus dem Markt auszutreten oder im weiteren Sinne das Geschäftsmodell auf andere Konsensmechanismen umzustellen mit denen geringere Nachteile für die Umwelt verbunden sind.

Aufgrund dieser Anreize für eine Entscheidung der Privatanlegenden für Kryptowerte mit geringeren Umweltauswirkungen gehen von der Kryptowerte-Whitepaperpflicht iSd MiCA-VO **positive Auswirkungen auf die Umwelt** aus.

#### Zusammenfassung: Whitepaper-Pflicht

Die Verpflichtung zur Veröffentlichung eines Kryptowerte-Whitepapers führt zu mehr Transparenz und zu informierteren Entscheidungen von Privatanlegenden. Privatanlegende können in der Folge die Umweltauswirkungen, die mit der Investition in Kryptowerte verbunden sind, besser beurteilen und in ihrer Anlageentscheidung berücksichtigen. Aus einer **rein monetären Betrachtung** ergeben sich daraus jedoch kaum Folgen für die Anlageentscheidung der Privatanlegenden, da ihnen durch die Umweltauswirkungen keine direkten monetären Kosten erwachsen. Bezieht man jedoch das zunehmende ökologische Bewusstsein von Privatanlegenden in die Anlageentscheidung mit ein, so kann sich aus der verbesserten Transparenz eine **Nachfrageverschiebung hin zu umweltschonenderen Kryptowerten** ergeben. Die Wirksamkeit der Maßnahme hängt im Ergebnis jedoch davon ab, dass die Anlegenden die entsprechenden Informationen zur Kenntnis nehmen und berücksichtigen.

Diese Nachfrageverschiebung kann wiederum Auswirkungen auf das Verhalten von gewerblichen Akteuren haben. Durch die sinkende Nachfrage bei Kryptowerten mit negativen Umweltauswirkungen kann auch eine **Verlagerung der gewerblichen Akteure auf umweltschonendere Kryptowerte** erfolgen. Insgesamt sind daher aus der Verpflichtung zur Veröffentlichung eines Kryptowerte-Whitepapers **leichte Anreize für einen nachhaltigere Einsatz von Blockchain-Anwendungen** als Finanzanlagen zu erkennen.

#### 4.4.3.2 Werbungskostenabzug für Energieaufwände

Anreize für eine nachhaltige Nutzung von Blockchain könnten sich aus der **ertragssteuerlichen Behandlung** von Kryptotoken, insbesondere aus dem Abzug von Werbungskosten für Energieaufwände, ergeben. Neben der Erzielung von Veräußerungsgewinnen im Handel mit Payment Token lassen sich Einnahmen im Zusammenhang mit Blockchain-Anwendungen auch aus dem sog. Mining/Forging generieren. Die Auswirkungen des Werbungskostenabzugs auf den Handel mit Kryptotoken erscheint mangels entsprechender Energieaufwände und damit einhergehender, hier zu berücksichtigender Anschaffungskosten, vernachlässigbar. Daher soll vorliegend nur das **Forging bzw. Mining** von Kryptotoken betrachtet werden.

Aus technischer Sicht lassen sich zwei wesentliche Ansätze zum Anfügen neuer Blöcke an die Blockchain unterscheiden.<sup>78</sup> Beim **Mining** (POW) ist zur Schaffung des nächsten Blocks derjenige Miner berechtigt, der zuerst ein mathematisches Rätsel durch Ausprobieren löst. Die Wahrscheinlichkeit des Erfolgs ist dabei von der eingesetzten Rechenleistung abhängig. Für das Lösen der Rätsel ist ein erheblicher Energieaufwand notwendig.<sup>2.1.5</sup>

Beim **Forging** (POS) bzw. **Minting** (POS) hingegen erfolgt die Auswahl nicht anhand der Lösung eines mathematischen Rätsels, sondern durch die zufällige Auswahl des Validatoren. Die Wahrscheinlichkeit als Validator gewählt zu werden steigt dabei mit der Höhe der eingesetzten Payment Token. Hierfür werden die Tokens gesperrt und als eine Art Kautions hinterlegt, womit garantiert sein soll, dass der Validator ein Interesse an der ordnungsgemäßen Blockerstellung hat (Vgl. BMF, 2022, Rn. 12). Die Validatoren müssen nicht zwingend Eigentümerin oder Eigentümer dieser Tokens sein. Es existieren verschiedenste Anbieter, die Dritten erlauben ihre Tokens zu staken, ohne dass diese selbst Blöcke erstellen und validieren müssen. Das zur Verfügung stellen der Tokens wird in der Praxis in beiden Fällen als Staking bezeichnet. Um die beiden Fälle klar zu unterscheiden, wird analog BMF der Begriff Staking vorliegend nur für die Bereitstellung des Stakes durch Dritte verwendet (BMF, 2022, Rn. 13).

Die Miner und Validatoren generieren dabei **Einnahmen**, indem sie für die Schaffung neuer Blöcke Belohnungen und Transaktionsgebühren in Form des für die jeweilige Blockchain typischen Payment Token erhalten. Während beim Mining die Einnahmen auf die Blockbelohnung und die Transaktionsgebühr beschränkt sind, sind die möglichen Belohnungen bei POS komplexer. Bei Ethereum erhält der Validator beispielsweise einen Teil der Transaktionsgebühren, wenn er einen Block schafft und eine Verifikationsgebühr, wenn er die Richtigkeit des Blocks attestiert.

Für Transaktionen erhalten Miner bzw. können Validatoren eine Gebühr in Form des jeweiligen Payment Token erhalten, wenn sie die Transaktion in den Block aufnehmen. Denn erst durch die Aufnahme in einen neuen Block wird die jeweilige Transaktion bestätigt. Die Wirksamkeit der Transaktion ist dabei - bei einer entsprechenden Vertragsgestaltung - regelmäßig bedingt durch die Aufnahme in die Blockchain.

Auf der **Ausgabenseite** stellen die Energieaufwände eine wesentliche Ausgabenposition der Miner/Validatoren dar. Sie tragen erheblich zur Wirtschaftlichkeit des Mining/Forging bei. Je höher die Energieaufwände, desto geringer ist der Gewinn den der Miner/Validator generieren kann. Mit höheren Energieaufwänden bzw. höheren Energiekosten sinkt ceteris paribus<sup>79</sup> daher die Rentabilität des Mining/Forging.

---

<sup>78</sup> Daneben sind zwar weitere Ansätze, wie bspw. Proof-of-Authority, bekannt. Sie sollen der Übersichtlichkeit halber hier jedoch nicht behandelt werden.

<sup>79</sup> Latein: "unter sonst gleichen Bedingungen".

Aus ertragssteuerrechtlicher Sicht stellen sowohl Mining als auch Forging einen **Anschaffungsvorgang**, d.h. den *“entgeltlichen Erwerb eines bestehenden oder bereits vorhandenen Wirtschaftsguts von Dritten”* (BFH Ur. v. 02.05.2000 – IX R 73/98 –, BFHE 192, 435 Orientierungssatz 3) und **kein** Herstellungsvorgang iSd *“Schaffens oder Schaffenlassens eines noch nichtexistierenden Wirtschaftsguts”* (BFH Ur. v. 02.09.1988, III R 53/84, BFHE 154, 413 Orientierungssatz) dar. Grund dafür ist, dass die Kryptotoken, die als Belohnung für das Mining oder Forging ausgeschüttet werden bereit zuvor bestanden.<sup>80</sup> Sie werden durch die Ausschüttung lediglich erstmalig in Verkehr gebracht (BMF, 2022, Rn. 33). Das Forging wird daher als entgeltlichen Erwerb von Dritten behandelt (BMF, 2022, Rn. 33). Als Anschaffungskosten gilt der Marktkurs im Zeitpunkt der Anschaffung (BMF, 2022, Rn. 43). Die Einordnung dient insbesondere auch der Abgrenzung von ICOs bei denen der Emittierende die Ausgestaltung der Token im Einzelnen noch beeinflussen kann (BMF, 2022, Rn. 33).

Die ertragssteuerliche Behandlung der Einkünfte die aus Mining oder Forging erzielt werden, unterliegen in der Folge der Besteuerung **als Einkünfte aus Gewerbebetrieb** (§ 15 EStG) oder der Besteuerung als **private Einkünfte sonstiger Art** gem. § 22 Nr. 3 EStG (BMF, 2022, Rn. 45). Entscheidend für die Abgrenzung, ob die Besteuerung nach § 15 EStG oder nach § 22 Nr. 3 EStG folgt, ist die Einstufung als Gewerbebetrieb (§ 15 Abs. 2 EStG). Sie hat im Einzelfall zu erfolgen. Als Kriterien für die Abgrenzung können die Höhe der Investitionskosten und der Ressourcenaufwand herangezogen werden (Heuel/Matthey, 2018, S. 1053; Kollmann, 2021, Rn. 34).

Für die vorliegende Untersuchung kann diese Unterscheidung zwischen der Besteuerung als Gewerbebetrieb und der Besteuerung als Privatperson ignoriert werden. Investitionskosten und Energieaufwände können sowohl bei einer Einstufung des Forging als Gewerbebetrieb, als auch bei der Einstufung als private sonstigen Einkünfte von den **Einnahmen steuermindernd abgezogen werden**. Dies erfolgt bei gewerblichen Einkünften durch die Berücksichtigung als steuermindernde Betriebsausgabe (vgl. Kollmann, 2021, Rn. 39) und bei Privatpersonen als steuermindernder Werbungskostenabzug (BMF, 2022, Rn. 47). Der zu versteuernde Betrag reduziert sich folglich um Betriebsausgaben bzw. die Werbungskosten, die für das Mining bzw. das Forging angefallen sind. Verrechnet werden dürfen etwaige Verluste gem. § 22 Nr. 3 S. 3, 4 EStG aber nur mit Einkünften aus der gleichen Einkunftsart (Kollmann, 2021, Rn. 44).

Das bestehende System des Werbungskostenabzugs bezweckt keine Lenkung, da im Vergleich zu alternativen Anschaffungen bzw. Investitionen mit dem Werbungskostenabzug keine spezifischen Anreize gesetzt werden. Im Vergleich zu Alternativen werden die Miner/Validatoren für Investitionen weder belohnt, noch bestraft. Vielmehr versucht das Steuersystem durch den Werbungskostenabzug die tatsächlichen Überschussverhältnisse nachzubilden. Es können lediglich Werbungskosten geltend gemacht werden, die tatsächlich angefallen sind. Der Werbungskostenabzug zielt damit nur auf eine gerechte Berücksichtigung der Einkünfte, da der Investor nichts versteuern muss, was nicht nach Abzug der Ausgaben bei ihm vorliegt.

Der Zweck des Werbungskostenabzugs besteht darin, sicherzustellen, dass am Ende nur der tatsächliche Gewinn besteuert wird. Wird der Werbungskostenabzug für Krypto-Mining nicht zugelassen, führt dies zu einer systemwidrigen Besteuerung, da nicht der Gewinn, sondern die gesamten Einnahmen besteuert werden. Eine solche Ungleichbehandlung gegenüber anderen Geschäftstätigkeiten, bei denen Energieaufwendungen und Investitionskosten abgezogen werden können, würde jedoch zu einer Lenkungswirkung führen, da die Nettogewinne der

<sup>80</sup> Die Anzahl der schürfbaren Kryptowerte ist im Genesisblock beschränkt. Beispielsweise beträgt die Gesamtmenge für Bitcoin 21 Millionen Bitcoins.

Miner durch die fehlenden Abzugsmöglichkeiten reduziert würden. Die wirtschaftliche Attraktivität des Mining nähme ab, womit **positive Umweltauswirkungen** verbunden sein könnten, da der Gesamtenergieaufwand abnehmen würde.

Eine Abschaffung oder Begrenzung des Werbungskostenabzugs würde jedoch erheblich in das bestehende System des Steuerrechts eingreifen. Der Werbungskostenabzug ist das einfach-rechtliche Instrument, um das in Art. 12 und 14 GG verankerte **objektiven Nettoprinzip** auszugestalten (vgl. § 2 Abs. 2 EStG, zur verfassungsrechtlichen Bedeutung u.a. Kischel, 2023, Rn. 149 ff. m. w. N.). Es stellt einfach-rechtlich sicher, dass Steuern nur auf solche Einkünfte anfallen, die auch tatsächlich als Nettoeinnahmen angefallen sind. **Tatsächlich angefallene Ausgaben und Investitionen**, die mit der Erzielung der Einkünfte in Zusammenhang stehen, können von der steuerpflichtigen Person steuermindernd geltend gemacht werden. Indem von den tatsächlichen Einkünften die Ausgaben abgezogen werden, wird sichergestellt, dass nur der tatsächlich verbleibende positive Ertrag zu versteuern ist.

Aufgrund der verfassungsrechtlichen Bezüge des objektiven Nettoprinzips könnten sich verfassungsrechtliche Bedenken ergeben, die zu einer Verfassungswidrigkeit der Begrenzung des Werbungskostenabzugs für Energiekosten führen könnten. Zwar sind Begrenzungen des Prinzips der Nettobesteuerung bei sachlichen Gründen denkbar (BVerfG Beschl. v. 02.10.1969 - 1 BvL 12/68, Rn. 30, BStBl. II 1970, S. 140). Ein solcher Grund wäre mit dem Klimaschutz als widerstreitendes Gut von Verfassungsrang gegeben. Auf der Ebene der Angemessenheit einer solchen Maßnahme ist jedoch zu beachten, dass die Abschaffung oder Einschränkung des Werbungskostenabzugs dazu führt, dass die Steuerpflichtige nicht mehr nur das disponible Einkommen versteuern müsste, sondern alle Einkünfte ohne Abzug der Ausgaben. Würden Einkünfte ohne Berücksichtigung der Ausgaben besteuert, würden finanzielle Mittel besteuert, die dem Steuerpflichtigen gar nicht zur Verfügung stehen. Die finanzielle Leistungsfähigkeit wäre nicht zwangsläufig gegeben, weil die verausgabten Mittel nicht den Einnahmen gegenübergestellt würden. Im Ergebnis würden damit Einkünfte besteuert, die nicht mehr in Gänze disponible sind, weil sie die Steuerpflichtige aus Anlass der Einkünfteerzielung bereits verausgabt hat (vgl. auch allgemein zur Verortung Schneider, 2009, S. 90). Es würde dadurch der wirtschaftliche Erfolg so beeinträchtigt, dass er nicht mehr in der Besteuerung auf angemessene Weise zum Ausdruck kommt (vgl. dazu aber BVerfG Beschl. v. 25.09.1992 - 2 BvL 5, 8, 14/91, BVerfGE 87, 153 (169)). Einer Abschaffung des Werbungskostenabzugs könnte ein Geschäftsmodell unrentabel machen, weil sich die Besteuerung nicht mehr nach dem Gewinn richten würde (vgl. so auch im Ergebnis Schneider, 2009, 90). Im Ergebnis würde daher eine Abschaffung des Werbungskostenabzugs für POW-Miner von der Systematik des Steuerrechts abweichen.

Zwar kann der Gesetzgeber hier einschränkende Typisierungen in Form der Festlegung bestimmter Abzugsbeträge vornehmen (BVerfG Beschl. v. 10.04.1997 - 2 BvL 77/92, BVerfGE 96, 1 (9)), das Bundesverfassungsgericht hatte in der Entscheidung aber einen Fall zu beurteilen bei dem höhere Ausgaben als bei der Typisierung vom Steuerpflichtigen steuermindernd geltend gemacht werden konnten. Aufwendungen, die notwendig sind, um das Einkommen zu erzielen, sind vom Gesetzgeber zu berücksichtigen (dahingehend Schneider, 2009, S. 90). Einkünfte aus dem Mining sind allerdings ohne die Aufwendung von Energie nicht denkbar. Die Energieaufwände sind notwendige Bedingung, um durch Mining Einkünfte zu generieren. Insofern gebietet Art. 14 GG, dass die Ausgaben einkommensmindernd berücksichtigt werden.

### Zusammenfassung: Werbungskostenabzug

Aus dem existierenden Werbungskostenabzug entstehen im Vergleich zu alternativen Anschaffungen bzw. Investitionen keine Anreize, die zu einer Verhaltensänderung bei den Akteuren führen, da lediglich die tatsächlichen Einnahmen und Ausgaben für die steuerliche Behandlung abgebildet werden sollen. Entsprechend führt umgekehrt eine Abschaffung des Abzugs nur für Kryptowerte zu einer positiven Umweltwirkung, da die damit verbundenen Geschäftstätigkeiten dann weniger profitabel sind, und somit negative Anreize gesetzt würden. Rechtlich ist eine solche Ungleichbehandlung aber schwierig zu implementieren, da in einem solchem Fall Gewinne besteuern würden, die nicht vorhanden sind. Nach dem derzeitigen Steuerrecht werden Gewinne besteuert und nicht die Umsätze. Energiekosten können als Werbungskosten bei der Gewinnermittlung berücksichtigt werden.

#### 4.4.3.3 Einjährige Spekulationsfrist für Kryptotoken

Wirtschaftliche Anreize könnte sich aus der einjährigen Spekulationsfrist für die ertragssteuerliche Behandlung von Kryptotoken ergeben. Ein solcher Anreiz würde sich an Privatanlegende richten, die Payment Token erwerben. Bei gewerblich Anlegenden gilt die Spekulationsfrist nicht.

Erwerben Anlegende Payment Token, so ergeben sich u.a. **drei Möglichkeiten**, um mit diesen Token **Geld zu verdienen**: Die **Veräußerung der Token** nachdem die Kurse gestiegen sind und die Nutzung der erworbenen Token für das sog. **Forging/Staking**. Darüber hinaus können Anlegende die erworbenen Token einsetzen um ein passives Einkommen zu generieren (z.B. mittels Verleihung an Dritte (**Lending**)). Eine Veräußerung der Token setzt immer einen Wechsel des Rechtsträgers voraus. Wird ein Token lediglich von einem Account des Rechtsträgers in einen anderen Account desselben Rechtsträgers verschoben, so liegt keine Veräußerung vor.

Während sich im ersten Fall die Gewinne durch eine Differenz des Preises zum Zeitpunkt der Veräußerung abzüglich des Kaufpreises errechnen (**Veräußerungsgewinn**), können Anlegende im Falle des Staking zusätzlich durch die Durchführung von Transaktionsverifikationen weitere Token verdienen (**Rewards**). Im Falle des Lending erhalten Anlegende eine "**Leihgebühr**" durch die Leihenden. Die beiden letztgenannten Fälle treten zum klassischen Handel hinzu, stellen also eine **zusätzliche Einkommensquelle** neben dem Veräußerungsgewinn dar. Die Verleihenden gehen dabei allerdings auch ein größeres Risiko ein, das mit der Leihgebühr vergütet wird.

Veräußerungsgewinne aus dem Handel mit **Payment Token und Utility Token** können je nach Art der Tätigkeit entweder als **Einkünfte aus Gewerbebetrieb gem. § 15 Abs. 1, 2 EStG** oder als Einkünfte aus **privaten Veräußerungsgeschäften gem. §§ 22 Nr. 2, 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 EStG** eingestuft werden (BMF, 2022, Rn. 51 ff., 77, 80). Eine Versteuerung von (Kurs-)Gewinnen aus der Veräußerung von im Privatvermögen gehaltenen Token nach § 22 Nr. 2 iVm § 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 EStG erfolgt, wenn der Zeitraum zwischen der Anschaffung und der Veräußerung **nicht mehr als ein Jahr** beträgt. Die Veräußerung nach einem Jahr ist steuerfrei (Vgl. FG Köln BeckRS 2021, 46851). Verluste können gem. § 23 Abs. 3 S. 7 EStG nur mit Gewinnen aus privaten Veräußerungsgeschäften in demselben Kalenderjahr und gem. § 23 Abs. 3 S. 8 EStG mit den Gewinnen aus privaten Veräußerungsgeschäften im unmittelbar vorangegangenen Veranlagungszeitraum und dem folgenden Veranlagungszeitraum verrechnet werden. Ein darüberhinausgehender Verlustabzug findet nicht statt (vgl. Kollmann, 2021, Rn. 21). Fällt der Veräußerungsverlust nach einem Jahr an, kann er nicht mehr berücksichtigt werden (Himmer/Binder, 2022, S. 275). Durch das BMF wurde darüber hinaus klargestellt, dass die einjährige Spekulationsfrist auch dann gilt, wenn die Payment Token für das Staking bzw. Lending eingesetzt werden, also laufende Einnahmen generiert würden (vgl. BMF, 2022, Rn. 63;

ähnlich bereits Kollmann, 2021, Rn. 23). Dies war ursprünglich unklar. Es war denkbar, dass die Spekulationsfrist für die steuerfreie Veräußerung von Payment Token im Falle des Staking/Lending auch zehn Jahre gem. § 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 S. 4 EStG betragen könnte (s. 5.4.3). Hier soll jedoch im Weiteren - trotz der dargelegten Zweifel - die nach dem Schreiben des BMF klargestellte Behördenpraxis zu Grunde gelegt werden.

Einkünfte aus der Verwendung von Payment Token für das **Staking** werden nach § 22 Nr. 3 EStG besteuert (BMF, 2022, Rn. 48), sofern sie überhaupt ausnahmsweise einem privaten Geschäft zugerechnet werden können. Der spätere Veräußerungsgewinn der neu erhaltenen Token ist **nicht mehr steuerpflichtig** (Kollmann, 2021, Rn. 41). Sie wurden bereits bei der Auskehrung der Belohnung als sonstige Einnahmen (§ 22 Nr. 3 EStG) zum Anschaffungswert im Zeitpunkt der Anschaffung versteuert.

Erträge aus dem **Lending** werden in der Regel gewerbliche Erträge darstellen (Kollmann, 2021, Rn. 52). Werden Einkünfte aus dem Lending ausnahmsweise als privat eingestuft, so sind sie nach § 22 Nr. 3 steuerbar (BMF, 2022, Rn. 65, s. auch Kollmann, 2021, Rn. 56). Die spätere Veräußerung wird nicht erneut besteuert.

Durch das Staking bzw. Lending verlängert sich die Spekulationsfrist für Payment Token folglich nicht auf zehn Jahre (BMF, 2022, Rn. 63). Sie können weiterhin nach einem Jahr steuerfrei verkauft werden.

Vergleicht man die Besteuerung von Fremdwährungsgeschäften, so ergibt sich ein vergleichbares Ergebnis. Private Veräußerungsgewinne aus Fremdwährungsgeschäften werden nach § 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 EStG behandelt. Werden sie nach Ablauf der Spekulationsfrist veräußert, ist der Veräußerungsgewinn steuerfrei (vgl. Demuth/Jena, 2016, S. 205).

Werden durch die Fremdwährung Zinsen generiert, käme eine Verlängerung der Spekulationsfrist auf zehn Jahre gem. § 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 S. 4 EStG in Betracht. Würde man den Wortlaut des § 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 S. 4 EStG beachten, würde sich die Spekulationsfrist auf zehn Jahre verlängern, wenn mit der Fremdwährung Zinsen erzielt würden. Dem wird in der Literatur teilweise mit Hinweis auf den Zweck der Einführung einer zehnjährigen Spekulationsfrist zur Vermeidung eines bestimmten Steuersparmodells widersprochen. Durch eine teleologische Reduktion oder durch einschränkende Auslegung des Wortlauts soll die zehnjährige Spekulationsfrist bei Fremdwährungsgeschäften unberücksichtigt bleiben (Demuth/Jena, 2016, S. 205 ff. m. w. N.). Davon geht auch das bayerische Landesamt für Steuern aus (LfSt Bayern 10.3.2016 S 2256.1.1-6/6 St 32). Trotz bestehender Unsicherheiten und Zweifel ist daher auch für Fremdwährungsgeschäfte für die vorliegenden Zwecke eine Steuerfreiheit nach einem Jahr zu unterstellen. Zinserträge aus Fremdwährungen sind nicht nach § 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 EStG zu versteuern, weil sie nicht angeschafft werden. Sie gelten als zugeflossen (vgl. Demuth/Jena, 2016, S. 204 m. w. N.).

Im Ergebnis ist daher eine einheitliche Behandlung von Payment und Utility Token mit Fremdwährungsgeschäften zu beobachten. Ein ähnliches Ergebnis ergibt sich auch für Investitionen in Edelmetalle. Für die Ermittlung der Auswirkungen, die sich aus der einjährigen Spekulationsfrist für Anlegende auf das Anlageverhalten ergeben können, ist zu berücksichtigen, dass Steuern für das Anlageverhalten rational handelnder Anlegenden eine unmittelbare Rolle bei der Entscheidungsbewertung spielen, da sie Einfluss auf ihre Nettoerträge haben können (Bessler/Kurth, 2006, S. 1). Können Investierende die Payment Token nach einem Jahr steuerfrei verkaufen, so werden sie geneigt sein, diese Spekulationsfrist einzuhalten, um die Veräußerungsgewinne steuerfrei zu verkaufen und daher ihre Nettoerträge zu steigern. Aus der Möglichkeit des steuerfreien Verkaufs nach einem Jahr folgt eine Belohnung für die Anlegenden, wenn sie die Payment Token mindestens ein Jahr hält. Daraus folgt ein Anreiz für die

Anlegenden, die Token für **mindestens ein Jahr zu halten**. Die Wirkung dieses Anreizes steigt mit der Höhe des individuell anzusetzenden Steuersatzes.

Als **unmittelbare** Folge der Haltedauer von mindestens einem Jahr lässt sich eine **Abnahme der Anzahl von Transaktionen** ableiten, die mit einem Payment Token durchgeführt werden. Rational handelnde Anlegende werden innerhalb des Jahres nach dem Erwerb des Payment Token diesen nicht verkaufen, um ihn später steuerfrei verkaufen zu können.

Demgegenüber können sich aber auch **mittelbaren** Wirkungen aus der Steuerfreiheit von Veräußerungsgewinnen von Payment Token nach einem Jahr ergeben. Vergleicht man die Anlage in Payment und Utility Token, Fremdwährungen und Edelmetallen (Wirtschaftsgüter) **mit anderen Anlageformen**, so könnte die Anlage in Payment und Utility Token, Fremdwährungen und Edelmetallen steuerlich attraktiver sein als die Anlage in andere Anlageformen, wie beispielsweise Aktien. Veräußerungsgewinne bei Aktien werden mit ca. 25% Kapitalertragssteuer besteuert. Eine Haltedauer, nach der die Veräußerungsgewinne steuerfrei gestellt werden, gibt es nicht.

Vergleicht man nun beide Anlageformen, so folgt daraus, dass bei einem Anlegenden mit einem persönlichen Steuersatz von über 25% zwar die Steuerbelastung für Veräußerungsgewinne mit Wirtschaftsgütern innerhalb des ersten Jahres seit Erwerb größer wäre als bei Veräußerungsgewinnen aus Aktien. Dieser Nachteil von Payment Token geht jedoch nach einem Jahr Haltedauer verloren. Während Veräußerungsgewinne von Aktien auch nach einem Jahr Haltedauer weiterhin mit 25% versteuert werden, sind Veräußerungsgewinne bei Wirtschaftsgütern wie Payment und Utility Token nach einem Jahr steuerfrei. Betrachtet man folglich **allein die steuerliche Behandlung**, so werden **Investitionen in Wirtschaftsgüter gegenüber Aktien attraktiver**, wenn Anlegenden sie länger als ein Jahr halten möchten. Daraus könnte dann eine **Zunahme des Anlagevolumens** in Payment Token abgeleitet werden.

Aus der einjährigen Spekulationsfrist ergeben sich daher divergierende Auswirkungen: Aus der Spekulationsfrist ergibt sich ein Anreiz für eine längere Haltedauer, die in der Folge zu einer Abnahme der Anzahl der Transaktionen führt, andererseits die mögliche Zunahme des Anlagevolumens in Payment Token. Die Anzahl der Transaktionen und das Anlagevolumen in einem bestimmten Payment Token können jedoch gleichermaßen **Auswirkungen auf das Verhalten der Miner/Validatoren** haben. Der Einfachheit halber soll für die weitere Betrachtung unterstellt werden, dass die Anlegenden nur in einen Payment Token investieren könnten.

Die Höhe der Transaktionsgebühr hängt von der Anzahl der zu validierenden Transaktionen im Netzwerk ab. Steigt die Anzahl an Transaktionen, so konkurrieren mehr Transaktionen um einen Platz in dem neu anzufügenden Block. Dadurch müssen die Transaktionsbeteiligten mehr für eine Transaktion ausgeben, d.h. eine höhere Transaktionsgebühr in Aussicht stellen. Nimmt die Anzahl der Transaktionen ab, sinkt auch die Höhe der Transaktionsgebühr. Die **Höhe der Transaktionsgebühr** ist folglich von der Anzahl der Transaktionen im Netzwerk abhängig.

Grundsätzlich wird der Umfang der verarbeitbaren Transaktionen auch durch die Größe ihres Speicherbedarfs beeinflusst. Bei Bitcoin ist die Anzahl der verarbeitbaren Transaktionen auf etwa 1 MB pro Block begrenzt. Dieser Aspekt soll hier jedoch unbeachtlich bleiben. Stattdessen soll die gleichbleibende Speichergröße der Transaktionen unterstellt werden.

Da sowohl die Transaktionsgebühr als auch die Rewards in der Regel in der jeweiligen "Währung" bezahlt werden, hängt die wirtschaftliche Rentabilität auch mit dem **Preis** der jeweiligen Kryptowährung bzw. Kryptowerts zusammen. Mit einem sinkenden Wert sinkt auch die Rentabilität des Mining/Forging. Da mit dem Mining/Forging Ausgaben verbunden sind, können Anbietende aus dem Markt gedrängt werden.

Betrachtet man nun die zuvor gewonnenen Erkenntnisse über potenzielle Verhaltensänderungen der Anlegenden, so lassen sich divergierende Auswirkungen erkennen: Aus der **Zunahme des Anlagevolumens** in Payment Token wäre - bei unterstellter stabiler Anzahl von verfügbaren Payment Token – aufgrund einer steigenden Nachfrage gegenüber einem gleichbleibenden Angebot mit einem *Preisanstieg* zu rechnen. Dadurch würde das Mining von Payment Token attraktiver, weil die Rewards, die Miner für einen angehängten Block in Form des jeweiligen Payment Token erhalten, ebenfalls an Wert gewinnen würden. Es ist daher anzunehmen, dass mehr Miner im Markt aktiv werden. Bei Bitcoin kann eine unbegrenzte Anzahl an Miner aktiv werden. Bei Ethereum ist die Anzahl der Validatoren pro Epoche beschränkt, nicht jedoch in der Gesamtzahl. Für neue Validatoren ist der Einstieg jedoch zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr ökonomisch sinnvoll. Bis diese Grenze erreicht wird, wäre aber auch bei Ethereum eine Zunahme der Aktivitäten der Validatoren zu erwarten.

Demgegenüber könnte aus der **Abnahme der Transaktionen** ceteris paribus die Abnahme von Mining-Aktivitäten folgen. Die Vergütung der Miner ergibt sich neben der Belohnung für die Blockerstellung auch aus den Transaktionsgebühren für die Verarbeitung von Transaktionen. Nimmt die Anzahl der im Netzwerk zu verarbeitenden Transaktionen zu, können die Transaktionsgebühren steigen. Die Benutzenden sind bereit höhere Gebühren zu bezahlen, um sicherzustellen, dass ihre Transaktionen priorisiert und schneller verarbeitet werden. Wenn die Anzahl der Transaktionen sinkt, kann dies zu niedrigeren Transaktionsgebühren und weniger Wettbewerb um Blockraum führen, was die Einnahmen der Miner aus Transaktionsgebühren verringern könnte. Mit der Abnahme der Transaktionen sinkt ceteris paribus die Belohnung, die ein Miner für die Verarbeitung von Transaktionen erhält. Gleichzeitig nehmen die neu geschaffenen Bitcoins über die Zeit ab (Halving), so dass die Transaktionsgebühren mehr Bedeutung erlangen. Zusammengenommen sinkt damit die Attraktivität des Mining.

Diese Effekte können aber womöglich wieder durch Auswirkungen der geringeren Verfügbarkeit der Payment Token auf dem Markt ausgeglichen werden. Werden die Payment Token länger gehalten, so wird das Angebot der Token auf dem Markt verknappt. Daraus können sich zwei Wirkungen auf den Preis ergeben. Aufgrund einer Knappheit könnte bei gleichbleibender Nachfrage der Preis steigen. Durch einen steigenden Preis könnten dadurch die geringeren Transaktionsgebühren ausgeglichen werden. Auf der anderen Seite kann die längere Haltedauer Auswirkungen auf die Liquidität des Marktes haben, was negative Folgen für die Preisentwicklung hätte, da Investoren und Investorinnen von einer Investition absehen würden.

Die Auswirkungen, die sich aus einer verlängerten Haltedauer ergeben, sind folglich nicht eindeutig und können nicht abschließend bewertet werden. Sie blieben daher bei der weiteren Betrachtung unberücksichtigt.

Im Folgenden sollen nun die **Umweltauswirkungen**, die aus der Zunahme des Anlagevolumens folgen, betrachtet werden. Es soll unterstellt werden, dass der betrachtete Payment Token auf einem POW-Konsensmechanismus beruht, da die Umweltauswirkungen von POW gegenüber POS deutlich größer sind (vgl. Abschnitt 3).

Mit einer steigenden Aktivität von Miner aufgrund der Zunahme des Anlagevolumens wäre auch ein Anstieg des Energieaufwands verbunden, womit negative Folgen für die Umwelt verbunden wären.<sup>81</sup> Die Zunahme des Anlagevolumens wäre folglich mit **negativen Umweltauswirkungen** verbunden.

Für eine abschließende Bewertung der Anreize aus der einjährigen Spekulationsfrist ist zu bewerten, ob die **Anlageformen** verglichen werden können. Die Motivationslage für die

---

<sup>81</sup> Vorliegen wird unterstellt, dass die verwendete Energie nicht lediglich aus CO<sub>2</sub>-neutral produzierten erneuerbaren Energiequellen besteht.

Entscheidung für eine Anlageklasse erscheint deutlich komplexer als hier beschrieben. Auch rational Anlegenden werden nicht allein steuerliche Gründe für den Erwerb von Payment Token heranziehen. Während bei Payment Token häufig neben rein spekulativen Gründen auch Aspekte wie Misstrauen gegenüber der Finanzstabilität vor dem Hintergrund hoher Inflationsraten, vermeintliche Pseudonymität und Unabhängigkeit gegenüber Regulierungsbehörden eine Rolle spielen, stellen Aktien in erster Linie einen Anteil an einem Unternehmen dar mit der die Anlegenden am wirtschaftlichen Erfolg des Unternehmens partizipieren können. Ein Vergleich der Besteuerung von verschiedenen Anlageformen scheint daher nur begrenzte Aussagekraft über die mögliche Anlageentscheidung zu haben.

Darüber hinaus wurde dargelegt, dass die steuerlichen Vorteile, die für Payment und Utility Token gelten auch für andere Wirtschaftsgüter wie Fremdwährungen und Edelmetalle zur Anwendung gelangen. Die Anlageformen, die in einem Vergleich zu berücksichtigen wären, sind daher deutlich weiter als hier unterstellt. Anlegende werden selbst dann, wenn die steuerliche Unterscheidung als entscheidend für die Entscheidung unterstellt wird, nicht allein Payment und Utility Token, sondern generell Wirtschaftsgüter der Investition in Aktien vorziehen.

Die Auswirkungen auf das Verhalten, die aus der steuerlichen Attraktivität von Payment und Utility Token gegenüber Aktien abgeleitet wurden, können daher als **eher unwahrscheinlich** eingestuft werden.

#### Zusammenfassung

Aus der Steuerfreiheit von Veräußerungsgewinnen für Payment Token nach einem Jahr Haltedauer folgen zwei widersprüchliche **ökonomische Anreize**. Während die Spekulationsfrist zum einen zu einer **verlängerten Haltedauer** und damit zu einer **Abnahme der Transaktionen** führt, wird zum anderen die Anlage in Payment Token gegenüber anderen Anlageformen attraktiver, womit eine **Zunahme des Anlagevolumens** und damit eine Preissteigerung verbunden wäre.

Die **Zunahme des Anlagevolumens** würde dabei gleichzeitig zu einer Zunahme der Mining-Aktivitäten bei Payment Token führen. Dadurch würden die negativen Umweltauswirkungen bei POW-basierten Payment Token weiter zunehmen. Im Hinblick auf den Vergleich mit anderen Anlageformen würde die Spekulationsfrist folglich **negative Anreize im Hinblick auf Nachhaltigkeit** führen. Dieses Ergebnis ist jedoch als **eher unwahrscheinlich** zu bewerten.

Die Auswirkungen, die sich aus einer **Abnahme des Transaktionsvolumens** ergeben, können aufgrund divergierender Effekte nicht abschließend bewertet werden.

Zusammenfassend sind daher aus der einjährigen Spekulationsfrist voraussichtlich eher **negative Umweltauswirkungen** zu erwarten.

#### 4.4.3.4 Förderbedingungen für Blockchain-Projekte

Nicht zuletzt können sich Anreize für einen nachhaltigen Einsatz von Blockchain auch aus den Förderbedingungen für bestimmte Blockchain-Projekte in der Europäischen Union ergeben. Die Europäische Union strebt die Förderung der weiteren Verbreitung von Blockchain- und DLT-Lösungen an. Zu nennen sind insbesondere die Förderprogramme "Digitales Europa", "Horizont Europa" und "InvestEU".

Die Förderung im Rahmen des Programms "**Digitales Europa**" kann gem. Art. 14 Abs. 2 der Verordnung "Digitales Europa" durch Aufträge, Finanzhilfen oder Preisgelder erfolgen. Damit ein Projekt eine Förderung erhalten kann, muss es als förderfähig bewertet werden. Förderfähig sind gem. Art. 17 Abs. 1 der Verordnung "Digitales Europa" solche Maßnahmen, die zur

Erreichung eines der in den Artikeln 3-8 der Verordnung "Digitales Europa" genannten Ziele beitragen können. Die Förderung der Einführung von fortgeschrittenen digitalen Technologien wie der Distributed-Ledger-Technologie (z.B. Blockchain) im öffentlichen Sektor und der Industrie ist gem. Art. 8 Abs. 1 lit. f der Verordnung "Digitales Europa" Teil des **spezifischen Ziels 5 (Einführung und optimale Nutzung digitaler Kapazitäten und Interoperabilität)**. Daneben soll auch die weitere Verwirklichung vertrauenswürdigen Austauschs von Daten durch die Verwendung von DLT gefördert werden (Art. 8 Abs. 1 lit. i).

Die Gewährungskriterien werden in Art. 20 der Verordnung "Digitales Europa" näher spezifiziert. Zu berücksichtigen sind bei einer Förderung gem. Art. 20 Abs. 2 lit. b der Verordnung "Digitales Europa" unter anderem auch die erwarteten Auswirkungen der Projekte auf die Wirtschaft, Gesellschaft, Umwelt und das Klima. Die Kommission führt hierzu im Annex zur Durchführungsentscheidung für das Programm Digitales Europa für 2021-2023<sup>82</sup> aus, dass als Teil der Evaluationskriterien auch die **Auswirkungen der Projekte auf die Nachhaltigkeitsziele** der Union im Rahmen des europäischen Green Deals berücksichtigt werden sollen. Sie sind Teil des Evaluationskriteriums "Impact" (vgl. EU-Kommission 2023a, S. 5 f.; EU-Kommission 2021, S. 19).

Damit eine Maßnahme durch das **Programm "InvestEU"** gefördert werden kann, muss es unter anderem gem. Art. 14 Abs. 1 lit. b der Verordnung "InvestEU" in Anhang II der Verordnung genannt werden. Dort wird unter anderem auch in Ziff. 2 die Entwicklung, die Verbreitung und der Ausbau digitaler Technologien und Dienste genannt, die zum Ziel des Programms "Digitales Europa" beitragen. Davon sind auch Distributed-Ledger-Technologien und Blockchain erfasst.

Gem. Art. 8 Abs. 5 der Verordnung "InvestEU" werden Finanzierungen und Investitionen auf **ökologische, klimabezogene oder soziale Auswirkungen geprüft**. Bestehen derartige Auswirkungen, so wird die klimabezogene, ökologische und soziale Nachhaltigkeit geprüft, um möglichst geringe negative und möglichst große positive Auswirkungen auf Klima, Umwelt und Soziales sicherzustellen. Die jeweiligen Projektträger und Projektträgerinnen müssen die Auswirkungen bei dem Antrag auf Finanzierung darlegen. Art. 8 Abs. 5 der Verordnung "InvestEU" stellt ausdrücklich fest, dass **"Projekte, die nicht mit den Klimaschutzziele vereinbar sind," für eine Förderung nicht in Betracht kommen**. Zur Bewertung der Anträge auf Inanspruchnahme der EU-Garantie im Rahmen des Programms "InvestEU" wurde eine delegierte Verordnung<sup>83</sup> erlassen, die Bewertungskriterien für diese Anträge enthält.

Die Darstellung der ausgewählten Förderprogramme zeigt, dass Investitionen Distributed-Ledger-Technologien und Blockchain ein nicht unwesentlicher Bestandteil europäischer Förderprogramme darstellen. Für rationale Investorinnen kann es daher sinnvoll sein bei der Einführung von verschiedenen Blockchain-/DLT-bezogenen Maßnahmen Fördermittel zu beantragen. Durch die monetäre Unterstützung im Rahmen dieser Programme kann eine Wettbewerbsfähigkeit zuvor noch nicht marktfähiger Produkte erreicht oder Investitionshürden abgebaut werden. Sofern Investoren solche Fördermittel für eine Maßnahme beantragen möchten, steigen ihre Chancen auf eine Zuteilung mit der Verringerung der zu erwartenden Umweltauswirkungen. Da nur solche Maßnahmen gefördert werden, deren Umweltauswirkungen möglichst gering sind, werden die Investorinnen für eine umweltschonende Ausgestaltung der Maßnahme durch die monetäre Förderung belohnt. Durch eine umweltschonende Ausgestaltung der Maßnahme steigen ihre Chancen für eine positive Bewertung des Förderantrages. Rational handelnde Investorinnen werden daher die

82 C (2021) 7911 final v. 10.11.2021.

83 Delegierte Verordnung (EU) 2021/1078 der Kommission v. 14.04.2021 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2021/523 des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Festlegung der Investitionsleitlinien für den InvestEU-Fonds.

Blockchain-Anwendung so gestalten, dass die Umweltauswirkungen weitestgehend minimiert werden. Für neu einzuführende Blockchain-Projekte lassen sich daher aus den Förderbedingungen **positive Anreize** für eine nachhaltigen Einsatz der Blockchain-Anwendungen erkennen.

Die **Reichweite** der Anreize für eine umweltschonende Gestaltung der Blockchain-/DLT-Anwendung ist freilich **begrenzt**. Sie kommen lediglich für solche Anwendungen in Betracht, die vom Anwendungsbereich der Förderprogramme erfasst werden. Auf Anwendungen, die von vorneherein nicht von den Förderprogrammen umfasst sind, kommen unmittelbare Anreize nicht in Betracht.

Mittelbar sind jedoch Anreize denkbar, wenn die Förderung geeignet ist die Wettbewerbsbedingungen zugunsten der geförderten Maßnahmen zu verschieben. Dies ist in den meisten Fällen jedoch nur eingeschränkt in nächster Zukunft zu erwarten, da in erster Linie solche Technologien gefördert werden sollen für die bspw. Marktversagen oder suboptimale Investitionsbedingungen vorherrschen (vgl. Art. 14 Abs. 1 lit. a iVm Anhang II VO "InvestEU"). Solche Technologien können zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht mit Technologien, die nicht gefördert werden sollen, konkurrieren.

### Zusammenfassung

Während ihm im Falle einer umweltschädlichen Gestaltung die Gewährung von Fördermittel voraussichtlich verwehrt wird, wird der Investor dafür belohnt, wenn er umweltschonende Gestaltungen wählt. Die Reichweite der Anreize ist auf Maßnahmen beschränkt, die in den Anwendungsbereich der Förderprogramme fallen. Im Ergebnis gehen von den umweltbezogenen Förderkriterien **positive Anreize für eine umweltschonende Gestaltung** der zu fördernden Maßnahmen aus.

#### 4.4.4 Anreize außerhalb der Blockchain-spezifischen Regulierung

Neben den Anreizen, die sich aus der Blockchain-spezifischen Regulierung ergeben, sind auch weitere gesetzliche Regelungen und Mechanismen denkbar, die das umweltbezogene Verhalten der Akteure auf der Blockchain beeinflussen können.

##### EU-Treibhausgasemissionszertifikatehandel

Ein Anreiz zur nachhaltigeren Gestaltung von Blockchains könnte sich aus dem Treibhausgasemissionszertifikatehandel für Energieerzeuger und dessen Auswirkungen auf die Höhe des Strompreises ergeben. Die Wirtschaftlichkeit von energieintensiven Anlagen, wie beispielsweise Rechenzentren für das Mining von Kryptowerten, steht in engem Zusammenhang zum Strompreis. Durch das Mining bei POW-Blockchain entstehen den Minern unter anderem Kosten für die Energie, die sie für den Betrieb der eingesetzten Rechner aufwenden müssen. Die Aufwände der Miner für Energie stellen dabei einen der Hauptkostenfaktor des Krypto-Minings dar.

Die Kosten, die ein Miner für Energie aufwenden muss, sind daher maßgeblich für die Wirtschaftlichkeit des Krypto-Minings verantwortlich. Steigen die Energiekosten, so nehmen auch die Aufwände der Miner zu. Bei gleichbleibenden Einnahmen nimmt die Wirtschaftlichkeit des Mining ab. Rationale Miner werden daher grundsätzlich danach streben ihre Kosten für Energie zu reduzieren und meist Standorte mit geringen Stromkosten wählen (vgl. auch Gschnaidtner, 2021, Rn. 86 ff.). Unterstellt man für die weitere Betrachtung, dass Miner an einen bestimmten Standort gebunden sind, so führen steigende Stromkosten an diesem Standort zu einem Anreiz den eigenen Energiebedarf zu reduzieren.

Der teilweise vertretenen Ansicht, dass die bei der Stromerzeugung entstehenden Treibhausgasemissionen von den Minern nicht internalisiert werden (Gschnaidtner, 2021, Rn. 87), kann nicht uneingeschränkt gefolgt werden. Eine Internalisierung der Kosten für die Treibhausgasemissionen kann durch den Treibhausgasemissionszertifikatehandel erfolgen.

Durch die Richtlinie 2003/87/EG (Emissionshandels-RL) wurde ein System zum Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Union eingeführt.<sup>84</sup> Es dient gem. Art. 1 Emissionshandels-RL der kosteneffizienten und wirtschaftlich effizienten Reduktion von Treibhausgasemissionen in der Union, um die Klimaziele der Union gem. Verordnung (EU) 2021/1119 zu erreichen. In das deutsche Recht wurde die Richtlinie durch das Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG)<sup>85</sup> umgesetzt.

In den Anwendungsbereich des TEHG fallen gem. § 2 iVm Anhang I Teil 2 Nr. 1-4 TEHG unter anderem auch bestimmte Anlagen zur Stromerzeugung bei deren Betrieb CO<sub>2</sub> emittiert wird. Für solche Einheiten bedürfen gem. § 4 TEHG die Anlagenbetreiber und Anlagenbetreiberinnen eine Genehmigung zur Freisetzung der Treibhausgasen, die bei einer solchen in Anhang 1 Teil 2 Nummer 1 bis 32 genannten Tätigkeit entstehen. Sie wird auf Antrag von der zuständigen Behörde erteilt. Auf der Grundlage der gem. § 5 TEHG gemeldeten, im vergangenen Kalenderjahr verursachten Emissionen, wird berechnet wie viele Berechtigungen (Zertifikate) der Betreiberin zum 30. April an die zuständige Behörde abzugeben hat. Die abzugebenden Berechtigungen entsprechen den durch die Tätigkeit im vorangegangenen Kalenderjahr verursachten Emissionen. Für andere Treibhausgase als CO<sub>2</sub> wird ein CO<sub>2</sub>-Äquivalent berechnet. Die Einhaltung des Systems wird durch die zuständige Behörde überwacht (§§ 19 ff. TEHG).

Gem. §§ 8, 9 TEHG werden Berechtigungen entweder versteigert oder kostenlos zugeteilt. Es besteht eine begrenzte Emissionsmenge zur Verfügung, wodurch festgelegt wird wie viele Treibhausgase die vom Emissionshandelssystem erfassten Anlagen emittieren dürfen. Die Menge wird durch eine jährliche Reduktion verknappt. Neben der Versteigerung und der kostenlosen Zuteilung können die Anlagenbetreiber die Berechtigungen auch auf dem Markt erwerben. Nach § 7 Abs. 3 TEHG sind die Berechtigungen übertragbar.

Bei dem Emissionshandelssystem spricht man vom sog. **Cap and Trade-Prinzip**. Durch die knappe Menge an Emissionsberechtigungen und die Handelbarkeit der Berechtigungen am Markt entsteht ein Preis für die Emission der erfassten Treibhausgase. Dadurch entsteht ein Anreiz für die vom Anwendungsbereich des Emissionshandelssystems erfassten Unternehmen zur Reduktion der Treibhausgas-Emissionen (Umweltbundesamt, 2023).

Der Europäische Emissionshandel (EU-ETS) und seine Umsetzung im nationalen, deutschen Recht führt zu einer Bepreisung von Treibhausgasemissionen und damit zu einer Internalisierung der entstehenden Umweltkosten. Durch das Erfordernis einer Berechtigung für den Ausstoß von Treibhausgasen bei der Stromerzeugung **steigen die Kosten für die Stromerzeugung**, wenn dabei Treibhausgase emittiert werden. Die Betreiber und Betreiberinnen einer Anlage zur Stromerzeugung, die vom Anwendungsbereich des TEHG erfasst wird, sind verpflichtet eine Berechtigung für die Emission von Treibhausgasen zu verwenden, wenn die von ihnen betriebene Anlage Treibhausgase emittiert. Dadurch entstehen ihnen Kosten in Höhe des Marktpreises der Berechtigung/des Treibhausgasemissionszertifikats, entweder indem sie die Berechtigung am Markt erwerben müssen oder durch Nutzung einer

84 Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates v. 13.10.2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Union und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates, zuletzt geändert durch die Richtlinie (EU) 2023/958 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13.5.2023, ABl. L 130 115 (16.5.2023) und die Richtlinie (EU) 2023/959 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 10.5.2023, ABl. L 130, 134 (16.5.2023).

85 Treibhausgas-Emissionshandelsg v.21.7.2011 (BGBl. I S. 1475), das zuletzt durch Artikel 18 des G. v. 10.8.2021 (BGBl. 2021 I, 3436) geändert worden ist.

ihnen zugeteilte Berechtigung. Die Kosten für die Stromerzeugung steigen und damit auch der Strompreis.

Zwar ist der entgegengesetzten Ansicht zuzugestehen, dass aus dem EU-ETS kein unmittelbarer Anreiz für die Miner zur Senkung ihres Energieaufwandes entsteht. Sie sind nicht Adressaten des EU-ETS und regelmäßig nicht vom Anwendungsbereich erfasst. Durch das Mining entstehen **keine unmittelbaren Treibhausgasemissionen**. Vielmehr werden nur mittelbar Treibhausgase emittiert, indem die Miner Energie aufwenden, die ggf. unter Ausstoß von Treibhausgasen umgewandelt wurde. Ein unmittelbarer Anreiz zur Reduktion von Treibhausgasen entsteht nur für die CO<sub>2</sub>-Emittenten, die unmittelbar vom Emissionshandel erfasst sind.

Aus dem EU-ETS kann allerdings ein **mittelbarer Anreiz** zur Reduktion von Energieaufwänden folgen. Durch die Treibhausgasemissionen steigt der Strompreis, was zu einer Kostensteigerung bei den Minern führt. Diese Kostensteigerung kann vermieden werden, indem der Energiebedarf durch Energie gedeckt wird, bei deren Umwandlung keine – oder geringere – Mengen an CO<sub>2</sub>-Emissionen erzeugt wurden. Denn die Höhe der mit dem Mining (mittelbar) verbundenen Treibhausgasemissionen hängt stark mit der verwendeten Energiequelle zusammen (vgl. auch Gschnaidtner, 2021, Rn. 88). Diese mittelbaren Emissionen könnte beispielsweise durch einen Umstieg auf Strom aus erneuerbaren Energien zur Deckung des Energiebedarfs erreicht werden, ohne dass der Energiebedarf insgesamt reduziert werden müsste.

Gleichzeitig ist aber auch zu beachten, dass die Akteure auf eine solche Verpflichtung mit **Ausweichmaßnahmen**, vor allen Dingen mit einer **Verlagerung ins Ausland**, reagieren könnten. Zwar sind die Errichtung und der Betrieb von Mining-Farmen mit erheblichen Investitionen in physische Infrastrukturen verbunden, die eine Verlagerung erschweren. Von Verlagerungen kann aber auch dann gesprochen werden, wenn in Deutschland bzw. der EU Mining-Aktivitäten eingestellt und im außereuropäischen Ausland neue Mining-Aktivitäten aufgenommen werden. Das wäre der Fall, wenn sich das Mining in Deutschland bzw. der EU nicht mehr wettbewerbsfähig betreiben ließe. Bereits zum jetzigen Zeitpunkt entfällt lediglich ein geringer Anteil des Mining auf Deutschland, weil das Mining in Deutschland aufgrund der höheren Energieaufwände nur eingeschränkt wirtschaftlich möglich ist. Miner sind nicht auf einen Standort in der unmittelbaren Nähe ihrer Kunden angewiesen. Aufgrund des globalen, digitalen Marktes für Kryptowerte und Blockchain-Anwendungen besteht keine Abhängigkeit vom Standort der Mining-Farm.

Kommt es aber zu einer entsprechenden Verlagerung, so könnte gar eine Verschlechterung der Umweltwirkung gegenüber dem Status quo eintreten. Das ist der Fall, wenn die Aktivitäten in Länder verlagert werden, deren Strommix im Vergleich zu Deutschland einen größeren Anteil an fossilen Energieträgern aufweist (z.B. in die USA, vgl. dazu auch die Ausführungen zum Mining Verbot in China in Kapitel 5.4.1). Es würden dann im Vergleich zu einer Anlage, die in Deutschland mit dem durchschnittlichen Strommix betrieben wird, mehr Treibhausgase emittiert. In einem solchen Fall droht gar eine **Verschlechterung der Umweltwirkungen** gegenüber dem Status quo.

## Zusammenfassung

Im Ergebnis lässt sich daher aus dem EU-ETS ein Anreiz für die Miner zu einer nachhaltigeren Gestaltung von Blockchains durch einen Umstieg auf erneuerbare Energie ohne oder mit geringerem CO<sub>2</sub>-Ausstoß als Energiequelle für das Mining erkennen.

Es gilt jedoch zu beachten, dass dies nur zutrifft, wenn die Mining-Aktivität Strom bezieht, der unter das EU-ETS fällt. Findet das Mining außerhalb Europas statt, so greift diese Regelung nicht. Hohe Energieaufwände schaffen daher auch einen Anreiz für Miner, möglichst günstigen Strom zu beziehen, der nicht unter das EU-ETS oder andere Instrumente zur Internalisierung von CO<sub>2</sub> – Emissionen fällt. Dies kann zu einer Verlagerung ins Ausland führen.

## Energieeffizienzgesetz

Ein Anreiz zur Verbesserung der Umweltwirkungen von Blockchain könnte sich aus dem Energieeffizienzgesetz (EnEfG)<sup>86</sup> ergeben. Ziel des Energieeffizienzgesetzes ist die Reduktion des Primär- und Endenergieaufwands durch eine Steigerung der Energieeffizienz, schwerpunktmäßig durch einen reduzierten Endenergieaufwand (BT-Drs. 20/6872, S. 45). Es sieht in der Reduktion des Endenergieaufwands – neben dem Zubau weiterer erneuerbarer Energien – einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der deutschen und europäischen Klimaziele (§ 1 Abs. 1 EnEfG, BT-Drs. 20/6872, S. 45). Das gilt ausdrücklich nach der Gesetzesbegründung auch für Rechenzentren (BT-Drs. 20/6872, S. 58). Das Gesetz soll einen energieeffizienten Betrieb von Rechenzentren einfordern (BT-Drs. 20/6872, S. 58).

Die Vorgaben des EnEfG gelten gem. § 3 Nr. 24 EnEfG für Rechenzentren mit einer Nennanschluss von 300 kW. Der Begriff des Rechenzentrums wird in § 3 Nr. 24 EnEfG legaldefiniert. Danach handelt es sich bei einem Rechenzentrum um

- e) eine Struktur oder eine Gruppe von Strukturen für die zentrale Unterbringung, die zentrale Verbindung und den zentralen Betrieb von Informationstechnologie- und Netzwerk-Telekommunikationsausrüstungen zur Erbringung von Datenspeicher-, Datenverarbeitungs- und Datentransportdiensten mit einer nicht redundanten elektrischen Nennanschlussleistung ab 300 Kilowatt sowie
- f) alle Anlagen und Infrastrukturen für die Leistungsverteilung, für die Umgebungskontrolle und für das erforderliche Maß an Resilienz und Sicherheit, das für die Erbringung der gewünschten Dienstverfügbarkeit erforderlich ist, mit einer nicht redundanten elektrischen Nennanschlussleistung ab 300 Kilowatt,
- g) ausgenommen von den Regelungen sind Rechenzentren, die dem Anschluss oder der Verbindung von anderen Rechenzentren dienen und die überwiegend keine Verarbeitung der Daten vornehmen (Netzknoten).

Mining-Farmen, die bspw. dem Betrieb des POW-Konsensmechanismus dienen, können vom Begriff der Rechenzentren iSd § 3 Nr. 24 EnEfG erfasst sein. Voraussetzung ist, dass sie auch in den räumlichen Anwendungsbereich des Gesetzes fallen, d.h. in Deutschland angesiedelt werden. Ähnliche Pflichten gelten durch die Energieeffizienz-RL<sup>87</sup> für alle Rechenzentren im Anwendungsbereich dieser Richtlinie in der EU. Mining-Farmen dienen zur Datenspeicherung und Datenverarbeitung, indem sie Rechenoperationen im Zusammenhang mit dem POW-Konsensmechanismus durchführen. Sie werden regelmäßig die Anforderungen an eine redundante elektrische Nennanschlussleistung von 300 kW erfüllen und stellen keine

<sup>86</sup> Energieeffizienzgesetz v. 13.11.2023 (BGBl. 2023 I Nr. 309).

<sup>87</sup> Richtlinie (EU) 2023/1791 des europäischen Parlaments und des Rates vom 13.09.2023 zur Energieeffizienz und zur Änderung der Verordnung (EU) 2023/955.

Netzknoten dar. Folglich werden **Mining-Farmen** mit dem **Standort Deutschland** regelmäßig vom **Anwendungsbereich des Gesetzes** erfasst sein.

Das EnEFG enthält verschiedene Verpflichtung für die Betreiber von Rechenzentren. Erstens gelten für Rechenzentren nach § 11 Abs. 1, 2 EnEFG **Verpflichtungen zur Einhaltung einer bestimmten Energieverbrauchseffektivität**. Darüber hinaus werden die Betreiber gesetzlich verpflichtet ab 01.01.2024 **50%** des Stromverbrauchs **bilanziell** aus Strom aus erneuerbaren Energien und ab 01.01.2027 **100% des Stromverbrauchs aus Strom aus erneuerbaren Energien** zu decken. Da die Betreiber nur bilanziell zur Deckung des Stromverbrauchs aus erneuerbaren Energien verpflichtet sind und nicht physisch, können sie die Verbrauchsdeckung auch durch entsprechende Zertifikate nachweisen (BT-Drs. 20/6872, S. 61).

Durch diese Verpflichtungen können die Treibhausgasemissionen von nationalen Mining-Farmen und damit die Umweltwirkungen von Blockchain erheblich reduziert werden. Wenn die Mining-Farmen ab 01.01.2027 100% ihres Stromverbrauchs aus erneuerbaren Energien decken müssen, stellt dies einen erheblichen Fortschritt für den Nachhaltigkeitsaspekt der Reduktion der Treibhausgasemissionen dar. Damit würden bilanziell Treibhausgasemissionen im Zusammenhang mit dem Mining für deutsche Mining-Farmen reduziert.

Gleichzeitig ist jedoch auch hier, ähnlich wie beim EU-ETS, zu beachten, dass die Maßnahme zwar auf lokaler Ebene wirkt, ihre Wirksamkeit auf globaler Ebene begrenzt sein könnte.

Zweitens werden die Betreiber von Rechenzentren **zur Errichtung eines Energie- oder Umweltmanagementsystems** verpflichtet. Außerdem müssen sie die in § 12 Abs. 2, 3 EnEFG genannten Verpflichtungen einhalten.

Die Betreiber von Rechenzentren können sich entscheiden, ob es ein **Energiemanagementsystem** iSd § 3 Nr. 16 EnEFG oder ein **Umweltmanagementsystem** iSd § 3 Nr. 29 EnEFG iVm EMAS-VO einführt. Die beiden Systeme unterscheiden sich in ihrer Reichweite, da das Umweltmanagementsystem auf die Bewertung aller Umweltbelange abzielt, während beim Energiemanagementsystem nur Energieaspekte berücksichtigt werden (Krappel, 2024, S. 453). In beiden Fällen sind die Betreiber von Rechenzentren verpflichtet Aspekte des Energieaufwands bzw. der Umweltwirkungen zu erfassen, Verbesserungspotentiale zu ermitteln und Umsetzungsstrategien zu entwerfen. Unter Umständen müssen diese Systeme gem. § 12 Abs. 3 EnEFG zertifiziert werden. Außerdem können die Betreiber von Rechenzentren von Veröffentlichungspflichten betroffen sein. Rechenzentren, deren wiederverwendete Energie zur Nutzung über ein Wärmenetz zu einem Anteil von mindestens 50% aufgenommen wird, sind von der Pflicht zur Einrichtung eines Energie- oder Umweltmanagementsystems gem. § 12 Abs. 4 EnEFG **befreit**, sofern ihr jährlicher durchschnittlicher Gesamtendnergieaufwand innerhalb der letzten drei abgeschlossenen Kalenderjahre die Schwelle von 7,5 Gigawattstunden nicht überschreitet.

Umweltmanagement- und Energiemanagementsysteme können zur **transparenten Erfassung von Energieeinsparpotentialen** beitragen. Dadurch kann das Bewusstsein für Energieeinsparpotentialen bei den Betreibern von Rechenzentren gestärkt werden. Bei den Betreibern von Mining-Farmen besteht allerdings bereits ein originärer Anreiz zur Reduktion des eigenen Energieaufwands. Die Energieaufwände stellen den wesentlichen Ausgabenposten der Betriebskosten von Mining-Farmen dar. Dennoch bedeutet dies nicht zwangsläufig, dass alle Energiesparmöglichkeiten auch tatsächlich genutzt werden – sie könnten noch nicht bekannt sein oder es könnte eine günstigere, aber weniger effiziente Hardware oder Kühlung bevorzugt werden, um die Investitionskosten zu verringern. Ob ein solches Managementsystem zur Aufdeckung neuer Potentiale beitragen kann, ist zwar nicht immer eindeutig, aber durchaus möglich.

Ein zusätzlicher Anreiz kann dann entstehen, wenn die Betreiber von Rechenzentren zur Veröffentlichung der Ergebnisse solcher Managementsysteme verpflichtet sind. Dann kann **öffentlicher Druck** entstehen, der die Unternehmen zur Umsetzung der darin vorgeschlagenen Maßnahmen motivieren kann (Krappel, 2024, S. 455).

Mining-Farmen treten jedoch in der Regel nicht in den direkten Kontakt zu Endkunden, sondern führen die Rechenoperationen durch, um die Belohnungen für die Blockerstellung zu erhalten. Diese Belohnungen in Form von Kryptowerten können dann zu einem Preis gehandelt werden, der auf einem internationalen Markt zustande kommt. Eine direkte Verbindung, wie sie bspw. beim direkten Vertrieb von Rechenkapazitäten an Endkunden besteht, liegt hier nicht vor. Daher ist eine solche Anreiz- bzw. Imagewirkung für die Betreiber von Mining-Farmen nicht zu erwarten.

Gleiches gilt für die Verpflichtung von Betreibern von Rechenzentren gem. **§ 13 EnEFG zur Veröffentlichung bestimmter Informationen**. Dadurch soll Transparenz hergestellt werden (BT-Drs. 20/6872, S. 62). Diese Transparenzvorgaben sollen es Kunden ermöglichen verschiedene Rechenzentren zu vergleichen (BT-Drs. 20/6872, S. 62).

Ein wesentlicher Anreiz mit **positiven Umweltwirkungen** kann sich aus § 12 Abs. 4 EnEFG ergeben. Wenn Rechenzentren **Energie i. H. v. min. 50% für das Wärmenetz bereitstellen**, so sind sie im Grundsatz von der Einführung und dem Betrieb eines Umweltmanagement- oder Energiemanagementsystems befreit. Für die Einführung und den Betrieb solcher Systeme bei Rechenzentren nach § 12 EnEFG ging die Gesetzesbegründung von Kosten i. H. v. 120,2 Mio. Euro für die Einführung und 134,5 Mio. Euro jährlichen Kosten für den Betrieb aus (BT-Drs. 20/6872, S. 3). Es besteht also ein erheblicher monetärer Anreiz diese Kosten zu vermeiden und von der Befreiung nach § 12 Abs. 4 EnEFG zu profitieren (BT-Drs. 20/6872, S. 61). Dadurch würde aber die negative Gesamtumweltwirkung von Rechenzentren und damit auch von Mining-Farmen gemindert.

Das Energieeffizienzgesetz berücksichtigt weder die sogenannten grauen Emissionen – also die erheblichen Emissionen, die bei der Herstellung von Servern entstehen – noch die negativen Umweltfolgen durch den Abbau von Rohstoffen und die großen Mengen an Elektroschrott, die das Mining erzeugt und anschließend entsorgt werden müssen.

### Zusammenfassung

Mining-Farmen mit Sitz in Deutschland fallen in den Anwendungsbereich des EnEFG und werden als Rechenzentren von den Verpflichtungen der §§ 11 ff. EnEFG erfasst. Daraus folgt eine Verpflichtung zur Errichtung und Durchführung von Energie- und Umweltmanagementsystemen.

Durch die Verpflichtung, den Strombedarf bilanziell zu 50 % bzw. 100 % aus erneuerbaren Energiequellen zu decken, reduzieren sich die Treibhausgasemissionen, die durch Mining in Deutschland verursacht werden. Wenn dafür keine neuen Anlagen für erneuerbare Energien entstehen, würde es jedoch zu einer Marktkonkurrenz um den erneuerbaren Strom kommen. Zudem beschränkt sich die Maßnahme auf lokale Effekte und berücksichtigt die globalen Umweltfolgen nicht.

Positiv hervorzuheben ist der Anreiz zur Nutzung von Abwärme, die beim Betrieb von Rechenzentren entsteht. Ein solcher Anreiz ergibt sich aus § 12 Abs. 4 EnEFG. Dadurch dürften sich die negativen Umweltwirkungen von Mining-Farmen verringern.

## 5 Entwicklung von Empfehlungen für eine Anpassung des regulatorischen Rahmens

Die Analyse des bestehenden regulatorischen Rahmens für Blockchain hat aufgezeigt, dass ein Defizit an Anreizen für einen nachhaltigen Einsatz von Blockchain besteht. Um das Ziel eines nachhaltigen Einsatzes von Blockchain und DLT-Lösungen zu erreichen, muss daher der regulatorische Rahmen angepasst werden. Hierzu sollen – ausgehend von der bisherigen Analyse – Empfehlungen für eine solche Anpassung des Rechtsrahmens entwickelt werden. Ziel ist die Schaffung eines regulatorischen Rahmens, der Anreize für einen nachhaltigen Einsatz von Blockchain und DLT-Lösungen setzt. Insbesondere sollen die negativen Umweltauswirkungen durch den mit der Nutzung von Blockchain einhergehende Energie- und Ressourcenverbrauch reduziert werden.

### 5.1 Ausgangslage

#### 5.1.1 Nachhaltigkeit und Klimaschutz als verfassungsrechtliche Vorgaben

Der Staat ist gem. Art. 20a GG zum Schutz und zur Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlage verpflichtet. Unter diesen Schutz der natürlichen Lebensgrundlage fällt die Erhaltung der Umwelt und ihrer Umweltgüter (vgl. u.a. Calliess, 2023, Art. 20a GG Rn. 32; Schulze-Fielitz, 2015, Art. 20a GG Rn. 32). Zu diesen geschützten Umweltgütern sind u.a. Boden, Luft und Wasser, aber auch das Klima und die Bodenschätze zu zählen (Calliess, 2023, Art. 20a GG Rn. 39; Schulze-Fielitz, 2015, Art. 20a GG Rn. 32 m. w. N.).

Ein wesentlicher Aspekt der Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlage und damit der Nachhaltigkeit stellt der Schutz des Klimas durch die Einsparung von Treibhausgasen dar. Treibhausgase sind für den globalen Klimawandel verantwortlich und tragen zur globalen Erderwärmung bei. Dadurch wird die natürliche Lebensgrundlage gefährdet. Art. 20a GG verpflichtet daher **alle staatlichen Organe zum Klimaschutz** mit dem Ziel der Herstellung von Klimaneutralität. Durch den Gesetzgeber wurde das Klimaschutzziel des Art. 20a GG auf das sog. **1,5 °C-Ziels** konkretisiert (BVerfG Beschl. v. 24.03.2021 - 1 BvR 2656/18, 78, 96, 288/20, E 157, 30 Ls. 2d). Nachhaltigkeit meint in diesem Zusammenhang daher eine **Reduktion des Ausstoßes von klimaschädlichen Treibhausgasen** auf den Reduktionspfad, der im Pariser Klimaabkommens vereinbart wurde.

Die staatlichen Organe sind verfassungsrechtlich verpflichtet Maßnahmen zu ergreifen, um einer globalen Erderwärmung und dem Klimawandel entgegenzuwirken. Die Schutzdimension der Grundrechte verlangt den Schutz vor Umweltbelastungen und vor den Gefahren des Klimawandels auch gegenüber künftigen Generationen (BVerfG Beschl. v. 24.03.2021 - 1 BvR 2656/18, 78, 96, 288/20, E 157, 30 Ls. 1). Eine vergleichbare Verpflichtung kann auch für die europäische Union aus Art. 3 Abs. 3 EUV, 37 GRCh und 11 AEUV zum Schutz der natürlichen Lebensgrundlage abgeleitet werden.

Der Klimabeschluss des Bundesverfassungsgerichts verlangt vom Gesetzgeber unter anderem die notwendigen **„Voraussetzungen und Anreize“** für eine **Transformation zur Klimaneutralität** zu schaffen (BVerfG Beschl. v. 24.03.2021 - 1 BvR 2656/18, 78, 96, 288/20, E 157, 30 Rn. 248). Diese Transformation ist nicht allein eine staatliche Aufgabe (BVerfG Beschl. v. 24.03.2021 - 1 BvR 2656/18, 78, 96, 288/20, E 157, 30 Rn. 248). Neben den staatlichen Stellen müssen auch private Wirtschaftsunternehmen und Einzelne den Transformationsprozess gestalten und ihr Verhalten verändern (Burgi, 2021, S. 1406). Die staatlichen Organe sind aber besonders dazu aufgerufen diese Anpassungsvorgänge anzustoßen.

Zu entscheiden welche Anstrengungen hierfür im Einzelnen erforderlich sind, ist Teil des **Gestaltungsspielraums des Gesetzgebers** (BVerfG Beschl. v. 24.03.2021 - 1 BvR 2656/18, 78, 96, 288/20, E 157, 30 Rn. 249). Da *“nahezu jegliches Verhalten unmittelbar oder mittelbar mit dem Ausstoß von CO<sub>2</sub> verbunden”* ist, sei eine umfassende Transformation in einer Vielzahl von Sektoren notwendig (BVerfG Beschl. v. 24.03.2021 - 1 BvR 2656/18, 78, 96, 288/20, E 157, 30 Rn. 37). Die einzelnen staatlichen Ebenen sind daher zur Anpassung über verschiedene Rechtsgebiete hinweg und zum Erlass *“konkreter Maßnahmen”* berufen (Burgi, 2021, S. 1403, 1405). Für welche Sektoren der Gesetzgeber dabei vorrangig Maßnahmen ergreift, ist seinem Gestaltungsspielraum überlassen.

Dabei wurde in der Literatur betont, dass der Klimabeschluss den Gesetzgeber keineswegs von der Beachtung allgemeiner rechtsstaatlicher Handlungsmaßstäbe befreit (Burgi, 2021, S. 1406). Vielmehr müssen weiterhin die *“allgemeinen Handlungsmaßstäbe für ein rechtsstaatlich-demokratisches Verwaltungshandeln (Effektivität, Kohärenz, Vermeidung von Dysfunktionalität)”* und die Rechte Dritter beachtet werden (Burgi, 2021, S. 1406). Burgi betont, dass trotz der Vorteile, die dem Einzelnen aus den Klimaschutzmaßnahmen im Hinblick auf die langfristige Freiheitssicherung erwachsen, der Gesetzgeber von der Rechtfertigung der Einzelmaßnahmen nicht entbunden ist. (Burgi, 2021, S. 1407 f.). Diese Maßstäbe sind auch bei klimaschützenden Maßnahmen weiterhin zu beachten.

### 5.1.2 Zusammenhang zwischen Blockchain und Treibhausgasemissionen

Mit der Blockchain-Technologie sind erhebliche Treibhausgasemissionen verbunden (vgl. 3). Dabei stoßen die Akteure zwar nicht unmittelbar selbst beim Betrieb der Blockchain die wesentlichen Emissionen aus. Die Treibhausgasemissionen entstehen vielmehr bei der Erzeugung des Stroms, der für den Betrieb der Rechner im P2P-Netzwerk benötigt werden. Das steht aber einer Berücksichtigung der jeweiligen Produktionsprozesse für den Klimaschutz nicht entgegen. Auch Verhalten das nur mittelbare CO<sub>2</sub>-Relevanz aufweist kann bei den Anstrengungen zur Transformation hin zur Klimaneutralität Berücksichtigung finden (BVerfG Beschl. v. 24.03.2021 - 1 BvR 2656/18, 78, 96, 288/20, E 157, 30 Rn. 37). Der Gesetzgeber ist aus rechtlicher Sicht nicht darauf beschränkt nur gegenüber den unmittelbaren Treibhausgasemittenten regulatorische Maßnahmen zu erlassen.

Der Energieaufwand im Zusammenhang mit Blockchain ist von den Entscheidungen der Blockchain-Akteure nicht entkoppelt. **Unmittelbaren Einfluss** auf den Energieaufwand – und damit mittelbar auf die damit verbundenen Treibhausgasemissionen – haben insbesondere die Miner bzw. Validatoren. Insbesondere abhängig vom Betrieb des Konsensmechanismus ist ein Großteil des Energieaufwandes einer Blockchain und damit ihrer Treibhausgasemissionen verbunden. Bei POW-Blockchain entsteht der Großteil der Treibhausgasemissionen während der Nutzungsphase (vgl. 3.1.3).

Die wesentlichen Entscheidungen, die eine nachhaltige Nutzung von Blockchain beeinflussen, liegen daher bei den Minern bzw. Validatoren. Sie entscheiden über den Einsatz der Hardware, über den Umfang der Rechenkapazitäten, die für das Mining/Forging eingesetzt werden und die jeweiligen Strom- und Energiequellen der Mining-Farmen. Durch eine Beeinflussung dieser Faktoren können sie auch innerhalb desselben Konsensmechanismus die Umweltwirkungen verändern. So ist die Höhe der Treibhausgasemissionen bei gleichbleibendem Energieaufwand von der Zusammensetzung des jeweiligen Strommix abhängig, aus dem die Energieaufwände gedeckt werden. Je mehr der Energiebedarf aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt wird, desto geringer sind die Treibhausgasemissionen.

Die Höhe der Treibhausgasemissionen und des Energieaufwands ist wesentlich vom jeweiligen Konsensmechanismus abhängig. Wie in Kapitel 3 ff. gezeigt wurde, ist insbesondere mit POW-

Blockchain ein immenses GWP und ein erheblicher Energieaufwand verbunden. Schon der Vergleich zwischen dem POW und dem POS-Konsensmechanismus zeigt, dass der Umfang der Treibhausgasemissionen von POW die Treibhausgasemissionen von POS signifikant übersteigt. Durch eine Umstellung des Konsensmechanismus können daher der Energieaufwand und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen wesentlich reduziert werden (Gschnaidtner, 2021, Rn. 89).

Ein **mittelbarer Einfluss** auf den Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen kommt den **Nutzerinnen der Blockchain-Anwendungen** zu. Regelmäßig werden sich die Nutzer und Nutzerinnen zwischen verschiedenen Blockchain-Anwendungen entscheiden können. Durch eine zunehmende Nachfrage von klimafreundlichen Produkten können auch die Nutzer von Blockchain-Anwendungen daher mittelbar die Transformation hin zu einem nachhaltigen Einsatz von Blockchain beeinflussen. Darüber hinaus beeinflusst das Transaktionsvolumen das Verhalten der Miner, da ein höheres Transaktionsvolumen zu höheren Einnahmen führen kann. Dadurch können die Mining-Aktivitäten zunehmen (vgl. auch im Detail 4.4.3.3)

### 5.1.3 Zusammenhang zwischen Blockchain und anderen Nachhaltigkeitsaspekten

Neben dem Ausstoß von Treibhausgasen ist der Betrieb von Blockchain auch unter anderen Nachhaltigkeitsaspekten zu betrachten. Nach dem vorliegenden Nachhaltigkeitsverständnis sind auch Aspekte eines schonenden Ressourcenverbrauchs in die Betrachtung mit einzubeziehen.

In diesem Zusammenhang ist vor allen Dingen der **Ressourcenaufwand bei der Herstellung von Hardware** und deren **Entsorgung** zu nennen. Für den Betrieb des POW-Konsensmechanismus werden spezialisierte Rechner eingesetzt, in deren Herstellungsprozess verschiedene Ressourcen aufgewandt werden. Die stetige Verbesserung der Hardware führt dazu, dass Miner gezwungen sind ihre Geräte regelmäßig auszutauschen, um bei der Rechenleistung mithalten zu können. Durch den Austausch der Hardware entsteht jedoch eine nicht unerhebliche Menge an **Elektroschrott**, die – ohne eine sachgerechte Verwertung der Abfälle – zu einem Verlust der Ressourcen führt. Im Sinne eines nachhaltigen Umgangs mit Ressourcen sollte daher die Nutzungsdauer von Geräten möglichst verlängert werden. Sofern eine Weiternutzung nicht mehr in Betracht kommt, ist auf eine mögliche Wiederverwendung der verbauten Materialien zu achten (vgl. auch Mittwoch, 2024, S. 64).

Ein weiterer Nachhaltigkeitsaspekt stellt der **Wasserverbrauch** im Zusammenhang mit der Kühlung der Prozessoren dar. Wasser stellt in einigen Weltregionen eine knappe Ressource dar mit der ein sparsamer Umgang angemahnt ist. Beim Betrieb von Mining-Farmen werden verschiedene Kühlmittel für die Kühlung der Prozessoren eingesetzt. Der Einsatz von Wasserkühlungen kann negative Auswirkungen auf den Wasserkreislauf haben. Zum einen müssen für die Wasserkühlung große Mengen Wasser aus dem natürlichen Wasserkreislauf entnommen werden. Zum anderen kann die Rückführung des erwärmten Wassers nach der Wasserkühlung zu einer Erwärmung der Gewässer im näheren Umkreis der Mining-Farmen führen.

Diese verschiedenen Nachhaltigkeitsaspekte sind grundsätzlich gleichermaßen bei der Entwicklung des regulatorischen Rahmens zu berücksichtigen. Dabei können jedoch Zielkonflikte zwischen den einzelnen Aspekten entstehen, die eine Priorisierung der Nachhaltigkeitsaspekte erforderlich machen können.

#### 5.1.4 EU-ETS als Anreiz für Reduktion der Treibhausgasemissionen

Wie bereits in 4.4.4 ausgeführt ergibt sich für Energieliefernde im Anwendungsbereich des EU-ETS ein Anreiz zur Reduktion der Treibhausgasemissionen bei der Energieproduktion. Auf die Energieverbraucher schlägt sich ein hoher Anteil fossiler Energien am genutzten Strommix durch einen erhöhten Strompreis nieder. Dadurch entsteht ein **Anreiz zur Reduktion des Energieaufwandes** oder eine Umstellung auf Energiequellen, die ohne oder mit geringerem Ausstoß von Treibhausgasen auskommen (vgl. 4.4.4). Als Stromverbraucherinnen werden auch Miner von dieser Anreizwirkung erfasst.

Dabei ist aber zu beachten, dass dieser Anreiz nur im **Anwendungsbereich des EU-ETS** und der nationalen Umsetzungsgesetze wirkt. Ist ein Blockchain-Akteur wie bspw. ein Miner nicht im Anwendungsbereich des EU-ETS ansässig und bezieht Energie aus einer Energiequelle, die nicht dem EU-ETS unterfällt, so wirkt der oben beschriebene Anreiz nicht. Zwar gibt es auch in anderen Jurisdiktionen vergleichbare Handelssysteme, sie sind aber nicht weltweit verbreitet und die Intensität der Anreizwirkung ist nicht einheitlich. Daher kann nicht von einem globalen Anreiz zur Reduktion des Energieanteils aus emissionsintensiven Quellen für Blockchain-Akteure gesprochen werden.

Akteure, bei denen eine solche Anreizwirkung entfällt, beteiligen sich aber gleichermaßen wie Akteure, die in den Wirkungsbereich des EU-ETS fallen, an den globalen P2P-Netzwerken. Dies führt zu einer Asymmetrie der Lenkungswirkung zwischen den verschiedenen Akteuren. Während für europäische Akteure eine nicht zu vernachlässigende Anreizwirkung besteht auf emissionsarme Energiequellen umzusteigen, fehlt ein entsprechender Anreiz für andere Akteure. Eine solche Asymmetrie, die zu ungewollten negativen Effekten führt („Leakage“), ist bei der Entwicklung von Regulierungsmaßnahmen zu beachten.

#### 5.1.5 Regulierungsziele

Regulierungen zielen unter anderem darauf ab, Marktversagen zu korrigieren oder ein Gut aufgrund von öffentlichem Interesse bereitzustellen. Vorliegend ist vor allem **Marktversagen** von Interesse. Es liegt vor, wenn der Markt selbst nicht in der Lage ist, Güter optimal zu verteilen, um den Nutzen aller Akteure bzw. die „soziale Wohlfahrt“ zu maximieren. Während der Markt grundsätzlich in den meisten Fällen dazu in der Lage ist, versagt er unter bestimmten Bedingungen.

Externe Effekte können zu Marktversagen führen, da sie bewirken, dass die von Marktakteuren wahrgenommenen privaten Kosten oder der private Nutzen nicht den gesellschaftlichen Kosten oder dem gesellschaftlichen Nutzen entsprechen.

Im Falle von Treibhausgasemissionen durch Blockchain-Technologie kann es zu erheblichen externen Effekten kommen, wenn Treibhausgasemissionen nicht durch Regulierung internalisiert werden (siehe Kapitel 5.1.4).

Regulierung kann dazu beitragen, externe Effekte zu internalisieren und Informationsasymmetrien zu reduzieren. Sie ist jedoch in der Regel nicht „kostenlos“, was entsprechend bei der Zielsetzung von Regulierung zu berücksichtigen ist. Eine Regulierung sollte möglichst **geringe volkswirtschaftliche Kosten** verursachen und gleichzeitig **wirksam** sein. Überwiegen die Kosten den volkswirtschaftlichen Nutzen, so sollte eine Regulierung nicht implementiert werden. Zu den Kosten zählen der Aufwand für die Umsetzung und Überwachung der Regulierung, aber auch unerwünschte Marktverzerrungen durch die Regulierung. Bzgl. der Marktverzerrung ist ein wichtiges Prinzip die Technologieneutralität. Sie bedeutet, dass die Regulierung keine bestimmte Technologie bevorzugen, sondern es den Marktteilnehmern durch geeignete Preissignale überlassen sollte, die effizienteste Lösung zu finden. Dies fördert

Innovation und Wettbewerb, was langfristig die Wohlfahrt erhöht. Im Gegensatz dazu kann eine technologiebasierte Regulierung zu Marktverzerrungen führen, wenn bestimmte Technologien bevorzugt werden, obwohl andere (aktuelle oder potenzielle) Technologien möglicherweise bessere Ergebnisse erzielen würden.

In diesem Zusammenhang sind auch einige der Ziele der Regulierung im Umweltbereich zu sehen. Die Regulierung soll darauf abzielen, **Marktversagen im Umgang mit Umweltressourcen** zu beheben. In Bezug auf die Blockchain soll somit sichergestellt werden, dass die **Umweltbelastungen auf ein volkswirtschaftliches Optimum reduziert** werden kann. Im Idealfall dadurch, dass die verursachten Externalitäten in die Kostenkalkulation der Anbieterinnen oder Nachfragerinnen einfließen und somit internalisiert werden.

Eine ordnungsrechtliche Maßnahme, z.B. ein Verbot, wäre aus statischer Sicht allenfalls dann gerechtfertigt, wenn der volkswirtschaftliche Nutzen kleiner als die volkswirtschaftlichen Kosten ist, d.h. die volkswirtschaftliche optimale Menge eines Gutes Null ist.

Außerdem soll sichergestellt werden, dass sich die Nutzerinnen der Umweltauswirkungen von Blockchain bewusst sind, damit sie **informierte Entscheidungen** treffen können. Schliesslich soll die Regulierung **effizient** sein, d.h. die Kosten sollten im Verhältnis zu ihrer Wirkung möglichst gering sein.

### 5.1.6 Ansatzpunkte für Instrumente zur Erreichung der Regulierungsziele

Anreize für den nachhaltigen Einsatz von Blockchain können auf vielfältige Art und Weise gesetzt werden. Hierfür kommen sowohl marktbasierende als auch ordnungsrechtliche Instrumente in Betracht.

Die Analyse des EU-ETS zeigt, dass eine Regulierung der Energielieferanten für Blockchain-Anwendungen meist nicht umsetzbar oder nur eingeschränkt wirksam ist. Die Treibhausgasemissionen entstehen hauptsächlich bei der Energieumwandlung. Eine First-Best Regulierung sollte direkt an der Quelle dieser Umweltwirkungen ansetzen, also bei den Treibhausgasemissionen der Energieumwandlung. Sie sollte nicht auf eine spezifische Tätigkeit (z. B. Mining) oder einen spezifischen Konsum (z. B. Bitcoin-Transaktionen) abzielen. Die Regulierung auf dieser nachgelagerten Ebene kann zu erheblichen Verzerrungen führen, da sie nur schwer technologieneutral gestaltet werden kann. Dadurch wird den Akteuren kaum Spielraum gelassen, selbst zu entscheiden, wie und wo sie die Umweltwirkung am effektivsten reduzieren können. Kann eine Regulierung die Umweltwirkung erfolgreich auf das optimale Ausmass reduzieren und überlässt es den Wirtschaftsakteuren selbst, wie dieses Ziel erreicht wird, dann wird von einem First-Best Zustand gesprochen. Es beschreibt den Markt-Zustand, bei dem die externen Effekte durch die Akteure selbst erfolgreich internalisiert wurden. In einem solchen Zustand sind die knappe Umweltressourcen optimal, wohlfahrtsmaximierend und daher ökonomisch effizient alloziert.

Ein **First-Best Zustand** ist jedoch nicht immer erreichbar. Wie das Beispiel des EU-Emissionshandelssystems (EU-ETS) zeigt, gelingt es einer regionalen Regulierung nicht, Externalitäten effizient zu internalisieren, wenn deren Auswirkungen global sind. Das Fehlen einer globalen Regulierung verhindert sozusagen den First-Best Zustand. Aufgrund verschiedener Faktoren, wie etwa der schwierigen politischen Umsetzbarkeit oder der Wahl falscher Ansatzpunkte (lokale Regulierung, obwohl eine globale Maßnahme erforderlich wäre), kann Marktversagen somit nicht vollständig behoben werden. In solchen Fällen ist es sinnvoll, einen **Second-Best Zustand** anzustreben, der zwar vom First-Best abweicht, aber besser ist als der Status quo. Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend Second-Best Instrumente diskutiert.

Hinsichtlich der Zielsetzung der Verringerung der Umweltaufwände sind folgende abstrakte Maßnahmen denkbar, die zum Gesamtziel einer nachhaltigeren Nutzung von Blockchain beitragen können:

**Umstellung des Konsensmechanismus:** Der Energieaufwand und damit die mittelbar verursachten Treibhausgasemissionen einer Blockchain hängt wesentlich vom jeweiligen Konsensmechanismus ab (Vgl. 3.1 und 3.2). Daher kann durch eine Umstellung des Konsensmechanismus der Blockchain eine Reduktion des Energieaufwands und damit der Auswirkungen auf das Klima erreicht werden (vgl. Gschnaidtner, 2021, Rn. 89). Wie der Ethereum-Merge zeigt, ist eine Umstellung des Konsensmechanismus durchaus praktikabel. Dabei sind jedoch auch die Vorteile der unterschiedlichen Konsensmechanismen gegeneinander abzuwägen. Bei einer Maßnahme, die auf die Umstellung des Konsensmechanismus abzielt, ist jedoch zu beachten, dass sie nicht technologieneutral und somit vom First-Best Zustand abweicht. Eine solche Maßnahme müsste sich gezielt gegen einzelne Konsensmechanismen richten und daher bestimmte Technologien gegenüber anderen vorziehen. Die Maßnahme erlaubt den einzelnen Akteuren nicht, wie sie die Umweltauswirkungen reduzieren bzw. die negativen Externalitäten internalisieren sollten. Da im Bereich DLT der POW-Konsensmechanismus für den Großteil der Umweltauswirkungsverantwortlich ist, wird die Maßnahme jedoch weiterverfolgt.

**Umstellung der genutzten Hardware:** Als weiterer Faktor für den Energieaufwand einer Blockchain ist die genutzte Hardware zu nennen. Hier sind zwei Punkte zu unterscheiden:

- ▶ Ressourcenverbrauch und Treibhausgasemissionen bei der Herstellung der Hardware: Bei der Produktion der Hardware werden in verschiedenen Produktionsprozessen Treibhausgase emittiert und Ressourcen verwendet (vgl. Abschnitt 3). Durch eine Verlängerung der Nutzungsdauer von Geräten können zusätzliche Ressourcenaufwände und Treibhausgasemissionen in der Herstellungsphase vermieden werden. Vgl. dazu auch die Entwicklung der Laufzeit der Hardware bei Bitcoin in der Beschreibung der CBECI-Methodenupdates (Neumüller, 2023). Darüber hinaus ist in der End-of-life-Phase auf eine umweltgerechte Entsorgung zu achten. Hierfür kann auf die bestehenden rechtlichen Regelungen zur Abfallentsorgung und Kreislaufwirtschaft verwiesen werden.
- ▶ Energieaufwand der Hardware: Der Energieaufwand von Blockchain-Akteuren hängt neben dem eingesetzten Konsensmechanismus von der eingesetzten Hardware ab. Je energieeffizienter die eingesetzte Hardware ist, desto eher kann der Energieaufwand der Blockchain reduziert werden. Für die Miner bei POW-Blockchains stellen die Kosten für den Energieaufwand, die in der Nutzungsphase für den Betrieb des Konsensmechanismus anfallen, einen wesentlichen Ausgabeposten dar. Es besteht daher bereits ein Anreiz für die Miner die Energieaufwände pro Hashberechnung zu reduzieren. Das erfolgt u.a. durch den regelmäßigen Austausch der Hardware zugunsten der effizientesten Hardware auf dem Markt. Indem Anreize für einen regelmäßigen Austausch der Hardware unterstützt werden, kann der Energieaufwand von Blockchains in Relation zur Hash-Rate reduziert werden. Darin zeigt sich ein Zielkonflikt zwischen den verschiedenen Nachhaltigkeitsaspekten: Einerseits können neuere Geräte die Energieeffizienz verbessern, andererseits führt der vorzeitige Austausch der Geräte zu weiterem Ressourcenaufwand.

**Nutzung erneuerbarer Energiequellen:** Die Nachhaltigkeit von Blockchain hängt im Wesentlichen von den emittierten Treibhausgasen ab, die bei der Umwandlung der eingesetzten Energie entstehen. Je größer der Anteil an erneuerbaren Energiequellen am verwendeten Energiemix ist, desto weniger Treibhausgase werden im Zusammenhang mit Blockchain emittiert. Es sollen daher Maßnahmen entwickelt werden, die die Nutzung von erneuerbaren Energiequellen incentivieren.

**Effizienter Einsatz von Rechenkapazitäten:** Bei dem Betrieb der Blockchain werden große Rechenkapazitäten eingesetzt. Beim POW-Mining kommt es zu einem Tullock-Wettbewerb<sup>88</sup>, der regelmäßig mit einer ineffizienten Überinvestition von Ressourcen und damit zu einer ineffizienten Ressourcenallokation einhergeht (Gschnaidtner, 2021, Rn. 82 ff. m. w. N.). Durch die Bildung von Mining-Pools könnte eine effizientere Ressourcenallokation erreicht werden (Gschnaidtner, 2021, Rn. 84).

**Nutzung alternativer Lösungen:** Blockchain bietet in einigen Anwendungsfällen spezifische Vorteile, die die Technologie gegenüber anderen Technologien überlegen macht. Dies ist aber keinesfalls in allen Fällen gegeben. Der rechtliche Rahmen sollte es den Parteien ermöglichen zwischen verschiedenen technologischen Lösungen zu wählen.

Bei der Konkretisierung der genannten abstrakten Maßnahmen ist zu berücksichtigen, dass durchaus Anwendungsbereiche in Betracht kommen in denen der Einsatz von Blockchain und DLT (auch) im öffentlichen Interesse erwünscht ist (Bundesnetzagentur 2024). Blockchain- oder DLT-basierte Technologien können zur Lösung verschiedener Alltagsprobleme beitragen. So nennt beispielsweise in EWG 41 der Ökodesign-Verordnung<sup>89</sup> explizit dezentrale Datensysteme als Basis zur Implementierung des digitalen Produktpasses. Damit dürften wohl DLT- und Blockchain-basierte Lösungen gemeint sein (Mittwoch, 2024, S. 68). Bei einer Regulierung von Blockchain und DLT ist daher darauf zu achten, dass nicht von vorneherein jede Möglichkeit zur Nutzung dieser Technologie ausgeschlossen wird. Es sollen daher technologieoffene Ansätze gewählt werden, die um einen Ausgleich des Interesses an einer Nutzung der Technologie mit dem Ziel der Nachhaltigkeit bemüht sind.

## 5.2 Spezifische Herausforderungen bei der Regulierung von Blockchain

Bei der Entwicklung von Empfehlungen für die Anpassung des regulatorischen Rahmens müssen Blockchain-spezifische Besonderheiten Rechnung getragen werden. Diese spezifischen Herausforderungen können eine effiziente Regulierung von Blockchain, die Anreize für einen nachhaltigen Einsatz von Blockchain setzt, erschweren oder einer solchen gar entgegenstehen. Insbesondere die Dezentralität, Internationalität und Pseudonymität von Blockchain-Anwendungen können erhebliche Auswirkungen auf die Wirksamkeit der Regulierungsansätze haben (vgl. auch für die Geldwäsche-Regulierung: Maume/Haffke, 2022, § 15 Rn. 7).

### 5.2.1 Dezentralität

Die grundlegende Idee der Blockchain baut auf dem **Verzicht auf einen zentralen Intermediär** auf (Nakamoto, 2008). In einem der Blockchain zugrundeliegenden P2P-Netzwerk sind die Parteien grundsätzlich mit gleichen Berechtigungen ausgestattet. Transaktionen werden unter Verzicht auf eine zentrale Stelle verifiziert, indem durch einen Konsensmechanismus **dezentral**

---

<sup>88</sup> In einem Tullock-Wettbewerb verwenden mehrere Teilnehmer Ressourcen, um einen Preis zu gewinnen. Die Gewinnwahrscheinlichkeit hängt dabei davon ab, wie viele Ressourcen jeder Teilnehmer im Vergleich zu den anderen investiert.

<sup>89</sup> Verordnung (EU) 2024/1781 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13.06.2024 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2020/1828 und der Verordnung (EU) 2023/1542 und zur Aufhebung der Richtlinie 2009/125/EG.

verteilte Nodes die Richtigkeit einer Transaktion bestätigen. Im Grundsatz sind P2P-Netzwerke daher dezentral aufgebaut. Ein einzelner Akteur oder eine einzelne Akteurin kann bei gleich verteilter Rechenkapazität nicht einseitig über Transaktionen entscheiden.

In der Realität weicht der Aufbau von Blockchain-Netzwerken zwar regelmäßig von diesem Idealbild ab, indem sich Rechenkapazitäten auf einzelne Akteure konzentrieren. Die grundlegende Idee einer Vielzahl von Akteuren, die gemeinsam ein Netzwerk betreiben und Transaktionen verifizieren, bleibt aber erhalten. Erst bei einer Überschreitung der kritischen Marke von 50% der Kontrolle über die Rechenkapazität kann es zu einer zentralisierten Konzentration im Netzwerk kommen.

Aus der Sicht des Regulierers stellt die Dezentralität eine wesentliche Herausforderung dar. Die **Wirksamkeit einer Regulierungsmaßnahme** ist immer auch von ihrer **Durchsetzbarkeit** abhängig. Hierzu wird regelmäßig auf die Unterstützung privater Akteure bei der Durchsetzung der gesetzlichen Regeln zurückgegriffen, bspw. bei der Geldwäscheregulierung durch die Unterstützung der gem. § 2 GWG zur Umsetzung des Geldwäschegesetzes Verpflichteten. Das GWG greift dabei auf Akteure zurück, die als Intermediäre den Kapitalverkehr kontrollieren können. Ein anderes Beispiel stellt der Abzug von Kapitalertragssteuern durch Finanz-, Kredit- und Wertpapierinstitute oder andere Akteure dar (§§ 43 ff. EStG). Dadurch können die Kosten der Durchsetzung für die Einzelnen (meist nicht-professionellen Akteure wie bspw. Kleinanleger) reduziert und auf professionelle Intermediäre verteilt werden. Zwar ist die Unterstützung der Durchsetzung gesetzlicher Regelungen durch Private für die Betroffenen mit nicht unerheblichen Aufwänden verbunden. Sie verfügen aber meist über die größeren Kapazitäten und können die dabei entstehenden Kosten an die Endkunden weiterreichen.

Solche Intermediäre, die Transaktionen abwickeln und als Mittelsperson zwischen den Parteien mitwirken können, sind bei einem P2P-Netzwerk allerdings gerade nicht zwingend gegeben. Teilweise haben sich zwar **Intermediäre-ähnliche Akteure**, wie beispielsweise zentrale Kryptobörsen oder Wallet-Anbieter herausgebildet. Sie sind aber für die Abwicklung von Transaktionen auf einer Blockchain **nicht zwingend erforderlich**. Die Indienstnahme der Ressourcen der Intermediäre zur leichteren Durchsetzung der Regelungen, wie beispielsweise die automatische Einbehaltung der Transaktionssteuer durch die Börse, ist daher vorliegend nicht flächendeckend möglich. Dies kann zu einer einseitigen Durchsetzung der Maßnahmen zu Lasten von Kleinanlegern führen. Meist sind dies weniger professionelle Akteure, die mangels entsprechender Expertise auf die Dienstleistungen der Intermediäre angewiesen sind, während professionellere Akteure die Intermediäre umgehen können. Diese Umgehungsmöglichkeiten zeigen sich bei Blockchain-Anwendungen verschärft. Daraus kann eine **asymmetrische Durchsetzbarkeit** von bestimmten Maßnahmen drohen, die sich schlechtestenfalls zu einem gleichheitsrechtlich problematischen strukturellen Vollzugsdefizit ausweiten kann. Gleichzeitig muss aber auch betont werden, dass die Dezentralität von P2P-Netzwerken nicht bedeutet, dass die Akteure, die sich nicht der Dienste eines Intermediären bedienen, aus dem Anwendungsbereich einer Norm ausgenommen werden. Die Vorschriften müssen auch dann für sie anwendbar sein, wenn sie Transaktionen ohne Intermediäre abwickeln. In diesen Fällen sollten aber andere Möglichkeiten gesucht werden, die eine Durchsetzbarkeit der Vorschriften sicherstellen können, um einer asymmetrischen Durchsetzbarkeit zu vermeiden. Andernfalls kann ein Regulierungsversagen drohen.

## 5.2.2 Internationalität

Als weitere Herausforderung für die Regulierung von Blockchain ist die internationale Verbreitung der Akteure zu nennen. Dabei sind verschiedene Dimensionen der Internationalität zu beachten. Die Herausforderungen aufgrund der Internationalität hängen stark mit der Dezentralität zusammen.

### Anwendungsbereich der Rechtsnormen und Durchsetzbarkeit

Die Internationalität des digitalen Rechtsverkehrs stellt die Rechtsordnung allgemein vor eine Herausforderung (v. Arnould, 2022, Rn. 864 ff.). Staatliche Hoheitsakte finden nach dem **Grundsatz der Gebietsausschließlichkeit** grundsätzlich nur auf dem Hoheitsgebiet des betreffenden Staates Anwendung und können nur dort durchgesetzt werden. Gesetze, die vom deutschen Gesetzgeber erlassen werden, gelten daher dem räumlichen Anwendungsbereich nach grundsätzlich nur in Deutschland. Die Befugnis Hoheitsakte auf fremdem Staatsgebiet vorzunehmen kann aber vertraglich zwischen den Staaten vereinbart werden.

Die Erstreckung des sachlichen Geltungsbereichs eines Gesetzes auf Auslandssachverhalte ist aber nicht ausgeschlossen (**jurisdiction to prescribe**). Zwar gelten Gesetze regelmäßig auch für Ausländer, wenn diese auf dem Hoheitsgebiet des Erlassstaates tätig werden (**Territorialitätsprinzip**). Allerdings können diese Gesetze ohne entsprechende Vereinbarung zwischen den Staaten nicht im Ausland vollzogen werden (**jurisdiction to enforce**). Daneben können gesetzliche Regelungen aber auch an die Staatsangehörigkeit eines Akteurs anknüpfen (Personalitätsprinzip, z.B. im Steuerrecht). Im Konfliktfall entscheidet das internationale Kollisions- oder Koordinationsrecht.

Die Blockchain ist als digitales Register nicht materialisiert und dadurch leicht vervielfältigbar. Das Register wird dezentral auf jedem Rechner, der an dem P2P-Netzwerk als Full-Node beteiligt ist, gespeichert. Die Nodes in P2P-Netzwerken sind über das Internet verbunden und können **weltweit verteilt** sein. Der rein digitale Austausch über das Internet ermöglicht einen weitestgehend ungehinderten grenzüberschreitenden Verkehr zwischen den Nodes, ohne dass es dabei notwendig zu höheren Transaktionskosten kommt. Zahlreiche (relevante) Akteure in P2P-Netzwerken sind regelmäßig aber nicht in Deutschland bzw. Europa ansässig. Darüber hinaus ist die Zuordnung eines Akteurs in ein bestimmtes Land häufig schwierig. Daraus folgt eine Entgrenzung der Blockchain-spezifischen Sachverhalte, die sich nicht auf eine allgemein geltende Rechtsordnung reduzieren lassen. Vielmehr ist entscheidend, dass für die jeweiligen Sachverhalte das geltende Recht im Einzelnen bestimmt wird. Die dabei bestehenden Unsicherheiten können eine effiziente Regulierung verhindern.

Das ist bei der Neufassung von regulatorischen Rechtsnormen für Blockchain-Anwendungen zu beachten. Häufig wird die Anwendbarkeit einer Rechtsnorm auf einen bestimmten Akteur unsicher sein. Die Akteure könnten für sich reklamieren nicht der Rechtsordnung eines bestimmten Landes zu unterfallen und daher nicht verpflichtet zu sein, die dort geltenden Vorschriften einzuhalten. Der Gesetzgeber muss daher Regelungen aufnehmen, die den **räumlichen Anwendungsbereich** und die Geltung der einzelnen Normen regeln, um Rechtsunsicherheiten zu vermindern. In den entsprechenden Gesetzen können Anknüpfungspunkte aufgenommen werden, die regeln, wann sich der Geltungsbereich der Rechtsnormen auf bestimmte Akteure erstrecken soll (z.B. Art. 2 MiCA-VO, s. auch für das sog. Marktortprinzip Art. 3 DS-GVO). Dafür bedarf es aber einer hinreichenden Anknüpfung zum Inland (**genuine link**, vgl. bspw. Reimer, 2021). Darüber hinaus ist die Durchsetzbarkeit der Rechtsnormen bei der Schaffung von regulatorischen Maßnahmen mitzudecken, um ein andernfalls drohendes Durchsetzungsdefizit zu verhindern. Diese Durchsetzung ist dabei auf das eigene Hoheitsgebiet beschränkt.

### **Verlagerung von Betreibern der Konsensmechanismen in andere Jurisdiktionen**

Maßnahmen zur Eindämmung des Energie- und Ressourcenverbrauchs könnten auf globaler, EU- und nationaler Ebene (z.B. in Deutschland) unterschiedliche Auswirkungen haben. Auf globaler Ebene wäre ein solches Verbot am effektivsten in Bezug auf die Umweltauswirkungen, aber auch am schwierigsten durchzusetzen. Innerhalb der EU könnte ein Verbot die Umweltauswirkungen reduzieren und nachhaltige Technologien fördern, jedoch auch zu einer Verlagerung von Aktivitäten führen. Auf nationaler Ebene würde ein Verbot kurzfristige Umweltvorteile bringen, könnte aber ebenfalls zu einer Verlagerung führen. Gerade vor dem Hintergrund des globalen Ziels des Klimaschutzes und der weltweiten Klimaerwärmung ist solchen Verlagerungstendenzen Rechnung zu tragen. Das Ziel der Schaffung eines Rechtsrahmens, der Anreize für einen nachhaltigen Einsatz von Blockchain setzen soll, kann nur erreicht werden, wenn extraterritoriale Effekte mitbedacht werden.

Als wesentliche energieintensive Akteure wurden die **Betreiber und Betreiberinnen des Konsensmechanismus** identifiziert. Ein Großteil der Energieaufwände und Treibhausgasemissionen entsteht in der Nutzungsphase von Blockchain (vgl. Kapitel 3 ff.). Bei diesen Akteuren ist eine Verlagerung in andere Jurisdiktionen nicht auszuschließen. Der Betrieb des Konsensmechanismus bedarf zwar erheblicher Investitionen in Rechenkapazitäten und die damit verbundene Infrastruktur (z.B. ASIC-Rechner, Kühlungssysteme), die als physische Güter an einen bestimmten Ort gebunden sind. Diese physischen Infrastrukturen können nur mit zum Teil erheblichem Aufwand verlagert werden. Im Gegensatz zu analogen Industriezweigen sind die Betreiber von Konsensmechanismen aber deutlich flexibler im Hinblick auf ihre Standort-Anforderungen. Als wesentliche Standortfaktoren lassen sich geringe Energiekosten und ein schneller Internet-Zugang identifizieren. Von anderen Standortfaktoren sind die Betreiber von Konsensmechanismen hingegen unabhängiger (z.B. Fachkräfte, Rohstoffe, Nähe zu Handelswegen und Absatzmärkten). Die digitale Verbreitung ihrer "Produkte" ermöglicht auch eine Standortwahl abseits des jeweiligen Zielmarktes (z.B. Ansiedlung in Argentinien oder Kasachstan), ohne dass dadurch der Zugang zu den internationalen Märkten für Kryptowerte abgeschnitten würde. Die Märkte sind digital vernetzt und daher weltweit über einen Internetzugang verfügbar.

Neben der Verlagerung der Blockchain-Aktivitäten unter Beibehaltung der gleichen Akteure, kann es auch zu einer Verschiebung der Aktivitäten durch eine Änderung der Akteure kommen. Eine intensive Regulierung von Betreibern von Konsensmechanismen in Europa könnte dazu führen, dass sich die Struktur der regionalen Verteilung der Akteure verschiebt. Wird beispielsweise die Tätigkeit des Minings in Europa erschwert, kann es zu einer Einstellung der Tätigkeit auf dem europäischen Markt kommen, wenn die europäischen Akteure mangels Wettbewerbsfähigkeit aus dem Markt gedrängt werden. So ist bspw. bereits zum jetzigen Zeitpunkt die Bedeutung Europas für das Bitcoin-Mining eher gering. Dies kann dann zu einer Ausweitung der Aktivitäten von Akteuren in anderen Ländern führen. Falls diese Länder einen höheren Anteil an Erneuerbaren Energien im Strommix haben, könnte sich die Umweltbilanz in der Nutzungsphase verbessern. Umgekehrt könnten wiederum höhere Treibhausgasemissionen entstehen, wenn der Energiemix des Landes der Neuansiedlung durch einen größeren Anteil an fossilen Energieträgern im Vergleich zu Deutschland oder Europa geprägt ist.<sup>90</sup> In der Tendenz ist deshalb davon auszugehen, dass eine Verlagerung in Länder mit tieferem Anteil erneuerbaren Energien zu höheren Umweltauswirkungen führt. Eine genaue Schätzung der Auswirkungen ist jedoch nicht möglich. Dies hängt insbesondere von den Grenzkosten der einzelnen Energieträger in den einzelnen Ländern ab.

---

<sup>90</sup> Die exakten Auswirkungen hängen vom Strommix und den jeweiligen Grenzkosten der verschiedenen Energieträger ab.

### **Mittelbare Auswirkung inländischer Blockchain-Nutzung**

Die bisherige Analyse hat gezeigt, dass Regulierungsbestrebungen in Deutschland und der Europäischen Union aufgrund der internationalen Verteilung der Minern bzw. Validatoren lediglich eine begrenzte Wirkung entfalten können. Allerdings können deren Aktivitäten in außereuropäischen Ländern nicht vollständig vom Verhalten inländischer Blockchain-Nutzerinnen entkoppelt werden. Unabhängig vom Standort der Miner/Validator werden Blockchain-Lösungen global und grenzüberschreitend angeboten. Das **Nachfrageverhalten inländischer Blockchain-Nutzer und Nutzerinnen** hängt daher **mittelbar** mit dem Energieaufwand und den damit verbundenen Treibhausgasemissionen in anderen Ländern zusammen.

Insbesondere bei Kryptowerten machen Akteure aus westlichen Ländern wie Deutschland einen wesentlichen Anteil der Nachfrager aus (Fischermann, 2024). Nur durch diese stabile Nachfrage kann ein hoher Preis für Kryptowerte erzielt werden, der wiederum für die Rentabilität des Betriebs des Konsensmechanismus notwendig ist. Die Nachfrage nach Blockchain-Lösungen und insbesondere nach Kryptowerten beeinflussen daher mittelbar den Betrieb des Konsensmechanismus in anderen Ländern. Dabei ist es aufgrund des globalen Marktes für Kryptowerten keinesfalls notwendig, dass die Nachfragerinnen und die Anbieter in derselben Jurisdiktion ansässig sind.

Die Blockchain-Nutzer sind zwar nur **mittelbare Verursacher von Treibhausgasen**, vergleichbar mit dem Käufer eines Kleidungsstücks. Von ihrem Nachfrageverhalten kann aber die Ausgestaltung neuer Blockchain und die Veränderungsfähigkeit bestehender Blockchain wesentlich abhängen. Denn die Rentabilität des Betriebs von energieintensiven Minern bzw. Validatoren steht immer auch in einem Zusammenhang zur Nachfrage durch Blockchain-Nutzer. Würde es beispielsweise zu einer Verringerung der Nachfrage nach Bitcoin kommen, so würde dies bei gleichbleibendem Angebot zu einem sinkenden Bitcoin-Preis führen. Die Rentabilität des Bitcoin-Mining würde abnehmen, was zu einer Reduktion von Mining-Aktivitäten führen könnte. In Anfängen lässt sich eine solche Veränderung des Nachfrageverhaltens wohl schon erahnen (Fischermann, 2024), ohne dass sich das jedoch bisher im Preis von Bitcoin abgebildet hätte.

Die Nutzerinnen von Blockchain-Anwendungen tragen somit mittelbar zu den Entscheidungen, die die nachhaltige Nutzung von Blockchain beeinflussen können bei, ohne dass die negativen Umweltfolgen notwendig in ihrem Heimatland entstehen. So sind die heimischen Blockchain-Nutzer zumindest mittelbar weiterhin für die im Ausland entstehenden Treibhausgasemissionen und Energieaufwände mitverantwortlich. Durch eine **Änderung des Nachfrageverhaltens** eines hinreichend großen Anteils an Blockchain-Nutzer am Markt kann daher voraussichtlich auch das **Verhalten der Miner bzw. Validatoren mitbeeinflusst** werden.

### **Kein verfassungsrechtliches Argument aus Internationalität gegen Regulierung für Klimaschutz**

Der Regulierung von Blockchain steht die Internationalität aus verfassungsrechtlicher Sicht jedenfalls nicht von vorneherein entgegen. Der nationalen Anpassung könne sich der Gesetzgeber nicht mit dem Verweis auf eine globale Notwendigkeit der Anpassung entziehen (BVerfG Beschl. v. 24.03.2021 - 1 BvR 2656/18, 78, 96, 288/20, BVerfGE 157, 30 Rn. 250). Dass nationale Maßnahmen auf Deutschland beschränkt seien und keine Auswirkungen auf internationale Märkte erkennbar seien, könne nicht der nationalen Anpassung entgegengehalten werden. Das BVerfG sieht vielmehr auch durch nationale Märkte eine gewisse Nachfragekraft und verweist darüber hinaus auf die Wechselwirkungen zwischen den nationalen Maßnahmen und internationalen Anstrengungen anderer Staaten (BVerfG Beschl. v. 24.03.2021 - 1 BvR 2656/18, 78, 96, 288/20, E 157, 30 Rn. 250), die selbst bei einer bloß beschränkten globalen

Wirkung eine nationale Regulierung zulassen könnten. Das BVerfG trifft damit aber lediglich eine Aussage über die verfassungsrechtliche Zulässigkeit der Regulierung trotz fragwürdiger Wirksamkeit aufgrund der bloß lokalen Wirkungen der Regulierungsmaßnahmen.

### Auswirkungen auf die Regulierung von Blockchain

Während die Betreiberinnen des Konsensmechanismus nur zu einem kleinen Teil in Deutschland und Europa ansässig sind, spielen europäische und deutsche Blockchain-Nutzer eine nicht unwesentliche Rolle auf den internationalen Märkten. Die Regulierung von Blockchain sollte sich daher nicht auf Maßnahmen gegenüber den Betreibern von Konsensmechanismen beschränken, die unmittelbar Treibhausgasemissionen verursachen. Auch die mittelbaren Verursacher und Verursacherinnen von Treibhausgasemissionen in Form der Nachfrager von Blockchain-Lösungen sollten Adressaten von Regulierungsmaßnahmen sein.

#### 5.2.3 Pseudonymität

Eine weitere Herausforderung für die Regulierung von Blockchain stellt die Pseudonymität der Akteure auf der Blockchain dar.<sup>91</sup> In der Blockchain erscheinen die Personen **nicht mit Klarnamen**, sondern regelmäßig wird lediglich deren **Public Key** angezeigt. Dadurch ist auf den ersten Blick eine Identifikation der hinter einem Public Key stehenden natürlichen oder juristischen Person nicht möglich. Zwar ermöglichen verschiedene Verfahren eine Identifikation einzelner Teilnehmer einer Blockchain, dies ist jedoch mit einem gewissen Aufwand verbunden. Nur durch eine solche Identifikation kann ermittelt werden, wer an einer Transaktion beteiligt war. Dies wird zusätzlich noch dadurch erschwert, dass eine natürliche oder juristische Person auch mehrere Public Keys betreiben kann oder durch sog. Tumbler oder Mixer die Transaktionen verschleiert werden können (vgl. Fromberger/Zimmermann, 2021, Rn. 106).

Dabei handelt es sich um eine wesentliche Herausforderung bei der Durchsetzung von Rechtsnormen gegenüber individuellen Akteuren auf der Blockchain. Die rechtliche Durchsetzung erfordert regelmäßig eine zweifelsfreie Identifikation der Akteure und einen Nachweis ihres Fehlverhaltens. Das ist nicht in jedem Fall gegeben und kann die staatlichen Rechtsdurchsetzungsstellen (z.B. Finanzamt, Strafverfolgung) vor Herausforderungen stellen.

Auf der anderen Seite ergeben sich aus der Gestaltung der Blockchain als nie vergessendes Register Vorteile für die Durchsetzung von rechtlichen Vorschriften. Die lückenlose Dokumentation von Vorgängen auf der Blockchain erlaubt bei einer entsprechenden Kenntnis der Akteure eine umfassende Nachvollziehbarkeit der Transaktionen. Hierfür ist lediglich notwendig, dass die jeweilige Behörde eine aktuelle Version der Blockchain erlangt, was bei einer public-permissionless Blockchain ohne Weiters möglich ist. Inwieweit solche Ermittlungsmaßnahmen aber praktisch durchsetzbar sind, ist noch fraglich. Die individuelle Identifikation der umfassenden Menge an Teilnehmer ist aufwändig, bei einem entsprechenden öffentlichen Interesse und Verdachtsfall (z.B. bei großen Transaktionen im Zusammenhang mit Geldwäsche oder dem verbotenen Handel mit illegalen Gütern) aber nicht ausgeschlossen.

#### 5.2.4 Zwischenfazit

Die genannten Herausforderungen für die Regulierung von Blockchain zeigen, dass drei Faktoren bei Blockchain zusammentreffen, die eine effiziente, wirksame Regulierung erschweren oder gar verhindern können. Die Dezentralität von Blockchain ermöglicht die Internationalität, die einen effektiven Zugriff durch einzelne Rechtsordnungen verhindert. Wird

---

91 Die Pseudonymität wird im Zusammenhang mit Blockchain häufig auch als Anonymität bezeichnet, ohne dass das aus datenschutzrechtlicher Sicht korrekt wäre (vgl. oben). Eine Identifikation der hinter einem Public Key stehenden Akteure ist nicht ausgeschlossen. Daher soll im Folgenden von Pseudonymität gesprochen werden.

das unerwünschte Verhalten in einer Jurisdiktion verboten, so kann es in anderen Jurisdiktionen fortgeführt werden, ohne dass sich etwas an der weltweiten Verfügbarkeit ändert. Gleichzeitig erschweren die dezentrale Verteilung und die Pseudonymität der Akteure die Durchsetzung der ergriffenen Maßnahmen und die Sanktionierung von Verstößen. Die einzelnen Faktoren beeinflussen und verstärken jeweils gegenseitig die Schwierigkeiten eine effiziente und wirksame Regulierung zu finden.

Sofern sich eine staatliche Stelle dennoch zur Regulierung von Blockchain entschließt, sollte beachtet werden, dass Regulierung durchaus auch den Status quo verschlechtern kann. Beispielsweise kann eine Verlagerung von Minern in Drittländer mit einem Energiemix mit höherem Anteil an fossilen Energieträgern und damit einer schlechteren Treibhausgasemissionsbilanz, zu einer Verschlechterung von Blockchain unter Nachhaltigkeitsaspekten führen. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis eines staatlichen Eingriffs ist daher auch gegen eine Beibehaltung des gegenwärtigen Status quo abzuwägen.

### 5.3 Typisierung von Regulierungsmaßnahmen

Um die beschriebenen Umweltziele zu erreichen, wurden in der Literatur verschiedene Typen von Regulierungsmaßnahmen identifiziert und deren Stärken und Schwächen diskutiert (vgl. Bengtsson et al., 2010, S. 7 ff.). Danach lassen sich vier Typen von Regulierungsmaßnahmen unterscheiden: ordnungsrechtliche Instrumente, informatorische Instrumente, freiwillige Vereinbarungen und ökonomische Instrumente (Bengtsson et al., 2010, S. 7).

#### 5.3.1 Ordnungsrechtliche Instrumente

Durch ordnungsrechtliche Instrumente sollen mittels Ge- und Verboten Umweltziele durch die gesetzliche Anordnung eines bestimmten Verhaltens erreicht werden (Bengtsson et al., 2010, S. 7). Die dabei ergriffenen Maßnahmen lassen sich weiter untergliedern in Qualitätsstandards, technologie- oder leistungsbezogene Standards und Einschränkungen oder Verbote (Bengtsson et al., 2010, S. 7 f.). Während bei den zuerst genannten Maßnahmen ein bestimmter Standard vorgeschrieben wird, richtet sich die zuletzt genannte Maßnahme gegen eine bestimmte Verhaltensweise.

Die Vorteile von solchen ordnungsrechtlichen Instrumenten liegen insbesondere in deren klar erkennbarer Zielsetzung (Bengtsson et al., 2010, S. 8). Auf der anderen Seite gehen derartige Ge- und Verbote zumeist mit einer geringen Akzeptanz durch die Verpflichteten einher (Bengtsson et al., 2010, S. 8). Die Privaten reagieren auf entsprechende Pflichten mit einem Ausweichverhalten zur Umgehung der Maßnahmen, zumindest sofern Substitute vorhanden sind. Daher sind solche Instrumente mit administrativen Durchsetzungs- und Überwachungsprozessen zu verbinden (Bengtsson et al., 2010, S. 7 f.). Vergleichbare Einschränkungen gelten auch für verbindlich festgelegte Produktions- und Qualitätsstandards. Sie sind nicht technologieneutral, schränken den Spielraum für Innovationsmöglichkeiten ein und sind daher auch mit Nachteilen verbunden.

Darüber hinaus sind diese Maßnahmen meist sehr unflexibel und führen daher zu hohen Gesamtkosten, weil sie nicht auf die spezifische Situation der Akteure eingehen können (Bengtsson et al., 2010, S. 8). Diese Inflexibilität kann durch leistungsbezogene Standards abgemildert werden, indem sie es der Entscheidung der Adressaten überlassen, wie ein bestimmtes Ziel erreicht werden soll. Zudem lassen sich ordnungsrechtliche Instrumente nur schwierig an neue Entwicklungen anpassen, was vor allem in sich schnell entwickelnden Umgebungen, wie der Blockchain-Technologie, zu großen Problemen führen kann. Ordnungsrechtliche Instrumente schaffen zudem Eintrittsbarrieren und sind anfällig für Rent-Seeking. Darüber hinaus tritt ihre Lenkungswirkung erst dann ein, wenn die Verbotsgrenze

erreicht wird. Bis zur Grenze des Verbots ist umweltschädliches Verhalten uneingeschränkt möglich.

Ordnungsrechtliche Instrumente sind vor allem dann sinnvoll, wenn ein Ziel schnell erreicht werden muss oder wenn das volkswirtschaftlich Optimum im Verbot einer Tätigkeit liegt. Durch ordnungsrechtliche Instrumente können unmittelbare Verhaltenspflichten angeordnet und dadurch beispielsweise irreversible Schäden verhindert werden. Ein Beispiel stellt das Verbot des Verkaufs bestimmter schädlicher Produkte oder Stoffe dar (Bengtsson et al., 2010, S. 7). Siehe zum Beispiel das Montrealer Protokoll von 1987 und in Folge dessen der weltweite Ausstieg aus Fluorchlorkohlenwasserstoffen.

Bereits in den 1990-er Jahren wurde die beschränkte Wirksamkeit von ordnungsrechtlichen Maßnahmen in der Umweltpolitik diskutiert (z.B. Sachverständigen Rat für Umweltfragen, 1994, S. 139 f.; Wagner, 1995, S. 1047 ff.). Nicht zuletzt auch aus verfassungsrechtlicher Sicht können mildere Maßnahme gegenüber "dirigistischen Regulierungsinstrumenten mit höherer Eingriffsintensität" vorzuziehen sein (Schlacke et al., 2015, S. 62). Dabei ist jedoch zu betonen, dass ein zielführender Regulierungsmix keineswegs auf ordnungsrechtliche Instrumente verzichten muss. Vielmehr ist gerade das Zusammenspiel von ordnungsrechtlichen und ökonomischen Instrumenten vielversprechend (vgl. Sachverständigenrat für Umweltfragen, 1994, S. 140; Sacksofsky, 2022, Rn. 59 m. w. N.; Wagner, 1995, S. 1050).

### 5.3.2 Informatorische Instrumente

Einen zweiten Typus regulatorischer Maßnahmen stellen informatorische Instrumente dar. Diese können anhand des Bereitstellers der Informationen unterschieden werden: Zum einen die Bereitstellung von Informationen durch staatliche Stellen an die Privaten und zum anderen die Pflicht für Private bestimmte Informationen über Umweltwirkungen bereitzustellen (Bengtsson et al., 2010, S. 11). Adressaten der durch die Privaten bereitgestellten Informationen können sowohl staatliche Stellen (z.B. Regulierungsbehörden) als auch die Öffentlichkeit sein.

Diese Instrumente zeichnen sich durch geringe Kosten ihrer Umsetzung aus. Gleichzeitig ist ihre Wirksamkeit aber wesentlich von der Empfänglichkeit der Adressaten für eine Information abhängig (Bengtsson et al., 2010, S. 11). Insbesondere bei entgegenstehenden ökonomischen Anreizen sind derartige informatorische Maßnahmen daher regelmäßig weniger wirksam. Gleichzeitig helfen die informatorischen Instrumente, allfällige Informationsasymmetrien zu vermindern und erleichtern es den Konsumenten, verschiedene Produkte und Services miteinander unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten zu vergleichen. Somit sind sie in der Lage die Nachfrage nach nachhaltigeren Produkten und somit den Wettbewerb in dieser Dimension zu beeinflussen.

### 5.3.3 Freiwillige Vereinbarungen

Als dritter Maßnahmentyp sind freiwillige Vereinbarungen und Selbstverpflichtungen der privaten Akteure zu nennen. Dabei sind unilaterale Selbstverpflichtungen, vertragliche Vereinbarungen mit den Betroffenen von Umweltauswirkungen und vertragliche Vereinbarungen mit staatlichen Stellen zu unterscheiden (Bengtsson, 2010, S. 12). Ihnen wird eine größere Akzeptanz zugesprochen, da die Verpflichteten am Ausgestaltungsprozess der Maßnahme beteiligt werden. Je nach Ausgestaltung kann eine solche Maßnahme auch mit weiteren Sanktionen bei einer Zuwiderhandlung verbunden werden (Bengtsson, 2010, S. 12 f.).

### 5.3.4 Ökonomische Instrumente

Den vermehrten Einsatz von ökonomischen Instrumenten hat der Sachverständigenrat für Umweltfragen bereits im Jahr 1994 angemerkt (Sachverständigenrat für Umweltfragen, 1994, S. 140). Mithilfe von ökonomischen Instrumenten sollen Anreize für eine bestimmte erwünschte Verhaltensweise gesetzt werden. Diese Instrumente bauen auf der theoretischen Grundlage eines Marktversagens auf und versuchen dieses möglichst effizient zu lösen. Marktversagen kann beispielsweise aufgrund von Externalitäten verursacht werden, die bspw. dann entstehen, wenn ein Produzent für eine dritte unbeteiligte Partei Kosten verursacht, die nicht in den Produktionskosten oder in den Produktpreisen abgebildet werden. Indem diese Kosten internalisiert werden, kann eine Berücksichtigung der externen Effekte und damit der tatsächlichen Kosten durch die Akteure erreicht werden (Bengtsson, 2010, S. 9; vgl. auch Abschnitt 5.1.5)

Besonders hervorzuheben sind hierbei handelbare Genehmigungen („Cap and Trade“), die bspw. beim Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten zum Einsatz kommen. Sie gelten in der Theorie als besonders effizient.

Ein weiteres ökonomisches Instrument ist die Erhebung von Steuern (und ähnliche Instrumente wie Abgaben), das ebenfalls negative externe Effekte internalisieren kann. Schließlich gelten auch Subventionen (und ähnliche Instrumente wie steuerliche Anreize, zinsvergünstigte Darlehen) als ökonomische Instrumente. Sie gelten allerdings als eher ineffizient und schaffen im Gegensatz zu den anderen ökonomischen Instrumenten keine Kostenwahrheit und können somit die externen Kosten nicht internalisieren (Bengtsson, 2010, S. 9).

Gemäß Theorie ist das „Cap and Trade“-System aus ökonomischer Sicht gegenüber anderen Instrumenten zu bevorzugen. Es verbindet die Vorteile der Preisinstrumente, die Kostenwahrheit schaffen, mit den Vorteilen der Mengeninstrumente, die die Einhaltung der festgelegten Umweltziele garantieren. Somit ist die Erreichung des angestrebten Umweltziels, nämlich die Einschränkung der Treibhausgasemission auf eine spezifische Menge, sichergestellt bzw. bei einer Überschreitung muss der Verursacher einen hohen Preis für die weitere Emission zahlen. Ein Nachteil von Emissionszertifikaten ist, dass der Preis der Zertifikate aufgrund des Zusammenspiels von Angebot und Nachfrage stark schwanken kann, was die Planungssicherheit und Prognostizierbarkeit der Preisentwicklung verringert. Zum Beispiel können technologischen Veränderungen oder die Festlegung von neuen Höchstmengen den Marktpreis beeinflussen. In diesem Zusammenhang können (kurzfristige) Preissenkungen auch die Reduktionsbemühungen beeinträchtigen. Ein Beispiel dafür waren die sinkende Preise am EU-ETS zwischen 2011 und 2017, die gemäß dem UBA auf zu tiefe Höchstwerte, Produktionsrückgänge und die Verrechnung mit internationalen Projektgutschriften zurückzuführen war (Umweltbundesamt 2023). Der Emissionszertifikatehandel kann daher besonders anfällig sein für politische Einflussnahmen, die über Gutschriften, Kompensationsmöglichkeiten oder eine übermäßige Ausgabe von Emissionsgenehmigungen die Preisbildung beeinträchtigen können. Vergleichbare Einschränkungen gelten auch für CO<sub>2</sub>-Steuern, die vom Gesetzgeber festgelegt werden und damit ebenfalls der politischen Einflussnahme unterliegen. Ihr Vorteil liegt jedoch vor allen Dingen in der besseren Planbarkeit, da die Höhe der Steuer im Ausgangspunkt stabil bleibt.

Die Vorteile von Emissionszertifikaten liegen insbesondere in ihrer besonderen Flexibilität und Effizienz. Die Akteure können selbständig entscheiden, wie sie die damit verbundenen Kosten berücksichtigen wollen. Bei der Ergreifung von Anpassungsmaßnahmen können sie ihren individuellen Situationen Rechnung tragen (Bengtsson, 2010, S. 10 m. w. N.). Wenn die marginalen Kosten der Emissionsreduktion höher als der Preis der Emissionszertifikate sind,

werden sich die Unternehmen weitere Emissionsrechte kaufen, wenn ihre Vermeidungskosten jedoch gering ausfallen, werden sie die Emissionen reduzieren und diese an anderen Firmen verkaufen.

Neben Emissionszertifikaten gibt es auch Steuern und Umweltabgaben, die zum Schutz der Umwelt eingesetzt werden können. Unter Umweltabgaben wird beispielsweise die vorgezogene Entsorgungsgebühr (Pfand) für Getränkeverpackungen verstanden, währenddessen der bekannteste Vertreter der umweltbezogenen Steuern, die CO<sub>2</sub>-Steuer darstellt. Sie haben den Vorteil, dass die – sofern korrekt gesetzt – Kostenwahrheit schaffen, dass also die externen Kosten in den Preis einfließt und das Marktversagen somit gelöst wird. Mit ihnen ist die Erreichung der jeweiligen Umweltziele jedoch nicht mit der gleichen Sicherheit vorhersagbar wie bei Mengen- bzw. ordnungsrechtlichen Instrumenten. Somit ist die Erreichung des angestrebten Umweltziels, nämlich die Einschränkung der Treibhausgasemission auf eine spezifische Menge mit diesen Maßnahmen nicht sichergestellt.

Eine weitere Kategorie von ökonomischer Maßnahme, die hierbei erwähnt werden muss, ist die Kategorie der Subventionen und subventionsähnlichen Instrumenten, wie bspw. Steuervergünstigungen. Subventionen sind aus ökonomischer Sicht ineffizient, da sie Mitnahmeeffekte generieren, die Investitionen in nicht-subventionierten, womöglich effizientere Technologien reduzieren und die wahre Knappheit eines Energieträgers vor den Konsumenten verschleiern. Trotz den Nachteilen sind Subventionen politisch einfach anwendbar und weit verbreitet.

Insbesondere die Zertifikate und die Steuern bewahren die Anreize für weitere Innovationen und technische Neuerung. Darüber hinaus können marktbasierende Anreize dynamische Anreize setzen, die sich mit einer steigenden Nachfrage und damit einhergehend steigenden Preis verstärkend auf das Verhalten der Akteure auswirken können. Daher versprechen gerade **ökonomische Instrumente** wie Zertifikate und Steuern **dauerhafte Anreize** für ein **nachhaltigeres Verhalten** der privaten Akteure.

## 5.4 Regulierungsmaßnahmen im Einzelnen

Aufbauend auf dieser Ausgangslage sollen im Folgenden einzelne Regulierungsmaßnahmen entwickelt und diskutiert werden. Die Regulierungsmaßnahmen sollen vor dem Hintergrund der Regulierungsziele anhand folgender Kriterien analysiert werden:<sup>92</sup>

**Wirksamkeit:** Beschreibt die Fähigkeit der Maßnahme das Ziel, eine nachhaltigere Nutzung von Blockchain, zu erreichen und somit das Marktversagen zu reduzieren. Bei der Beurteilung der Wirksamkeit wird die Frage gestellt, inwieweit der Eingriffsmechanismus zur Zielerreichung beiträgt. Die Wirksamkeit betrachten wir sowohl auf EU-Ebene, wie auch im globalen Kontext, vorausgesetzt die Maßnahme wird auf EU-Ebene *umgesetzt*.

**Effizienz:** Beschreibt die Kosten der Maßnahme im Vergleich zur Wirksamkeit. Wenn die Maßnahme bei minimalen Kosten und durch möglichst kleinen Marktverzerrungen ihre Wirksamkeit erzielt, ist die Maßnahme ökonomisch effizient. Bei den Kosten sind sowohl direkte Kosten, wie z.B. Aufwendungen für Subventionen, als auch indirekte Kosten, wie z.B. unerwünschte Marktverzerrungen, zu berücksichtigen.<sup>93</sup>

---

<sup>92</sup> Vgl. auch Better Regulation Guidelines EU (2021).

<sup>93</sup> Vgl. auch CEPS (2013) für eine ausführliche Beschreibung der direkten und indirekten Kosten von Regulierungen.

**Umsetzbarkeit:** Beschreibt inwieweit die Maßnahme hinsichtlich politischer, rechtlicher und praktischer Gesichtspunkte umsetzbar ist. Bei der Umsetzbarkeit fließen darüber hinaus auch der administrative Umsetzungs- und Durchsetzungsaufwand mit ein.

Es wird hierbei keine abschließende Bewertung vorgenommen. Diese bleibt dem politischen Gesetzgebungsprozess überlassen. Entsprechend wird der Fokus auf die Vor- und Nachteile der einzelnen Maßnahmen gelegt.

Basierend auf den in Literatur und Politik (vgl. jeweilige Quelle bei den Vorschlägen) sowie in Abstimmung mit dem UBA wurden folgende Maßnahmen identifiziert, die zum Ziel haben, die Umweltwirkung von Blockchain zu reduzieren. Ordnet man die Maßnahmen in die oben beschriebenen Arten von Regulierungsmaßnahmen (Abschnitt 5.3) ein, so ergibt sich folgende Kategorisierung der Maßnahmen:

**Tabelle 14: Kategorisierung der Regulierungsmaßnahmen**

Ordnungsrechtliche Instrumente	Informatorische Instrumente	Freiwillige Vereinbarungen	Ökonomische Instrumente
Verbot von Mining	Umweltlabel für Blockchains	Selbstverpflichtungen von Unternehmen	Importzölle/Abgaben/Subventionen bei der Erneuerung der Hardware
Verbot von Handel, Besitz und Dienstleistungen im Zusammenhang mit POW-basierten Kryptowerten	-	-	Beihilfen für Forschung und Entwicklung
Umweltverträglichkeitsprüfung für Mining Farmen (UVP)	Informationskampagne über den Energieaufwand neuer Technologien	-	Transaktionssteuer für Kryptowerte Verlängerung der Spekulationsfrist auf zehn Jahre
			Cap-and-Trade System

Quelle: Eigene Darstellung / Hellgrün – Auswirkungen auf den Betrieb der Blockchain, Grau– Auswirkungen auf den Handel der Kryptowerte.

### 5.4.1 Verbot von Mining

Im Rahmen des Gesetzgebungsverfahrens zur MiCA-VO wurde unter anderem ein Verbot des POW-Konsensmechanismus diskutiert (Fanta, 2022). Letztlich wurde von einem entsprechenden Verbot in der MiCA-VO jedoch abgesehen. Als potenzielle Maßnahme kommt ein Verbot von POW dennoch in Betracht.

#### Ausgestaltung der Maßnahme

Die genauere Ausgestaltung eines Verbotes von POW und seine Durchsetzung wurde im Gesetzgebungsprozess nicht weiter konkretisiert. Vorliegend sollen Vorschläge für die mögliche Ausgestaltung eines solchen Verbots gemacht werden. Durch ein nationales Gesetz oder eine europäische Verordnung könnte ein **Verbot des Mining von neuen Blocks im Zusammenhang mit dem POW-Konsensmechanismus** angeordnet werden. Adressaten eines solchen Verbotes wären die Miner mit Sitz in der EU bzw. in Deutschland. Ihnen würden Betätigungen zum Betrieb des POW-Konsensmechanismus untersagt. Der räumliche Anwendungsbereich eines solchen Betätigungsverbotes wäre aufgrund des Territorialitätsprinzips nur auf Miner mit Sitz in

der EU bzw. in Deutschland begrenzt. Es hätte keine Auswirkungen auf Miner, die in einer anderen Jurisdiktion ansässig sind.

### **Anreize und Umweltwirkungen**

Die Akteure können unterschiedlich auf ein Verbot als ordnungsrechtliche Maßnahme reagieren: Sie können die Maßnahme befolgen, ihr ausweichen oder gegen eine solche Maßnahme verstoßen. Der Fall eines Verstoßes gegen die Maßnahme soll vorliegend nicht betrachtet werden.

Im Falle der **Befolgung des Verbots** des Minings würden die Miner ihre Mining-Aktivitäten in Europa bzw. Deutschland einstellen. Nach der Einstellung des Mining würde sich der Energieaufwand und damit die Treibhausgasemissionen im Zusammenhang mit Blockchains in Europa bzw. Deutschland erheblich reduzieren. Ein nicht unerheblicher Teil des Energieaufwands und der Treibhausgasemissionen im Zusammenhang mit Blockchain entfällt auf die energieintensiven POW-Blockchains. Außerdem würde auch der zukünftige Ressourcenaufwand reduziert werden, da keine neue Hardware mehr durch die Miner erworben würde. Mit einem Verbot des Mining wären daher auf den ersten Blick **positive Umweltwirkungen in Europa bzw. Deutschland** verbunden.

Diese Wirkungen wären jedoch auf **Deutschland bzw. Europa beschränkt**. Von einer erheblichen positiven Umweltwirkung kann nur ausgegangen werden, wenn die wegfallenden Mining-Aktivitäten der europäischen bzw. deutschen Miner nicht durch eine Zunahme der Mining-Aktivitäten außerhalb Deutschlands bzw. der EU ausgeglichen würden. Durch die freiwerdenden Rechenkapazitäten können neue Miner, die nicht in den Anwendungsbereich der Maßnahme fallen, in den Markt eintreten, die sich verbesserte Wettbewerbsbedingungen erhoffen. Der positive Effekt durch die Aufgabe der Mining-Aktivitäten durch die europäischen bzw. deutschen Miner würde dadurch **aufgehoben**.

Eine weitere Ausweichmöglichkeit wäre die **Verlagerung der Mining-Aktivitäten** aus dem Anwendungsbereich des Verbots in andere Jurisdiktionen. Dadurch würden sich zwar die Energieaufwände und die Treibhausgasemissionen in Deutschland bzw. der EU reduzieren, die globalen Energieaufwände und Treibhausgasemissionen blieben aber zumindest gleich. Unter Umständen könnten sich die Treibhausgasemissionen auch gegenüber dem Status quo **intensivieren**, wenn die Miner in anderen Ländern ihren Energiebedarf vermehrt durch fossile Energieträger decken würde. Das könnte beispielsweise dann der Fall sein, wenn der Strommix in diesen Ländern weniger klimafreundlich wäre. In einem solchen Fall wären von der Maßnahme daher **neutrale** oder ggf. gar **negative Umweltwirkungen** zu erwarten. Die Umweltwirkungen von Blockchains würden sich gegenüber dem Status quo sogar noch **verschlechtern**.

Aufgrund der weltweit weiterbestehenden Nachfrage nach POW-Blockchain, insbesondere Bitcoin als wichtigster POW-basierter Kryptowert, ist es wahrscheinlich, dass der Marktaustritt deutscher oder europäischer Miner durch die Ausweitung der Mining-Aktivitäten im Ausland kompensiert wird. Die Verringerung der Mining-Aktivitäten in Deutschland bzw. der EU führt zu einer höheren Profitabilität der Miner im Ausland, da mit dem Wegfall der deutschen bzw. europäischen Rechenkapazitäten ihre Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Minings steigt. Dies führt zum Markteintritt weiterer Akteure im Ausland, wodurch die in Deutschland bzw. Europa weggefallene Rechenleistung kompensiert wird. Diese Ausweichreaktion ist im Hinblick auf die weiterhin bestehende globale Nachfrage nach POW-basierter Blockchain **wahrscheinlich** und konnte auf ähnliche Weise beim Marktaustritt chinesischer Miner beobachtet werden (hierzu sogleich).

Alternativ könnten die Miner auf ein solches Verbot des Mining durch **Ausweichmaßnahmen** reagieren. Eine Ausweichmöglichkeit wäre die **Umstellung des Konsensmechanismus**. Durch die Umstellung des Konsensmechanismus (z.B. von POW auf POS) kann eine Reduktion des mit der Blockchain verbundenen Energieaufwandes und damit auch der Treibhausgasemissionen erreicht werden. Der Eintritt einer solchen Reaktion ist aber **unwahrscheinlich**, da dies eine grundlegende Änderung des Blockchain-Protokolls bedingen würde. Dieser Änderung müssten alle Miner weltweit zustimmen. Mit den europäischen und deutschen Miner ist grundsätzlich nur eine sehr beschränkte Gruppe der Miner einer POW-Blockchain durch die Maßnahme betroffen. Für andere Miner außerhalb Deutschlands oder der EU, die nicht von einem Verbot erfasst wären, bestünde aber kein Anreiz der Umstellung des Konsensmechanismus zuzustimmen.

### **Bewertung der Maßnahme**

Aus theoretischen Gesichtspunkten spricht für ein Verbot von POW als **ordnungsrechtliches Instrument** dessen klar definiertes Ziel (vgl. 5.3.1). Für die Betroffenen sind die daraus zu ziehenden Handlungsfolgen – die Einstellung des Mining bzw. des Angebots von Kryptowerte-Dienstleistungen – unmittelbar ersichtlich. Die Maßnahme ist daher besonders rechtssicher.

Dem stehen aber **Bedenken hinsichtlich der Wirksamkeit** einer solchen Maßnahme gegenüber. Ordnungsrechtliche Instrumente sind stets auf eine effektive Durchsetzung angewiesen, damit sie die erwünschten Effekte erreichen können. Andernfalls droht die Maßnahme ins Leere zu gehen. Daher sind solche Instrumente häufig mit zum Teil erheblichen **Durchsetzungs- und Überwachungskosten** verbunden.

In anderen Ländern wurden vergleichbare Verbote von POW bzw. Bitcoin als bekanntester POW-basierter Kryptowert bereits erlassen. Betrachtet man diese Verbote, so wird eine **geringe unmittelbare Wirksamkeit** deutlich. China hat im September 2021 den Handel und das Mining von Bitcoin verboten. Trotz einem sehr großen Anteil von chinesischen Minern am Netzwerk war die Hash-Rate des Bitcoin-Netzwerkes (Maß für die Mining-Aktivität) im Januar 2022 wieder gleich groß wie im Sommer 2021. Trotz des Verbots von Bitcoin in China, sind chinesische Investoren weiterhin stark an einer Investition in Bitcoin interessiert (Kamp, 2023).

Ein **allgemeines Verbot von POW-Blockchains** würde zwar wohl die Verfügbarkeit von POW-basierten Blockchain-Anwendungen in Europa reduzieren; es würde aber nicht zu einer vollständigen Verdrängung von POW-Blockchains führen. Ein solches räumlich auf das Territorium der EU begrenztes Verbot von POW hätte keine Auswirkungen auf die globale Verfügbarkeit von digitalen Produkten wie Bitcoin, v.a. nach der "Legalisierung von Bitcoin ETFs" durch die U.S. SEC und dem Einstieg großer traditioneller Finanzmarktakteure in den Bitcoin ETF Handel. Selbst wenn technische Maßnahmen gegen den Abruf von POW-Blockchain ergriffen würden, könnte ein europäischer bzw. deutscher Nutzer mittels einer Standortverschleierung weiterhin POW-basierte Anwendungen aus dem außereuropäischen Ausland (illegal) benutzen.

Ein Grund für die schwierige Durchsetzbarkeit eines generellen POW-Verbots stellt die dezentrale, weltweite Verbreitung der Nodes da. Sie erschwert eine effektive Durchsetzung und kann im Falle eines Verbots zu einer Verlagerung der Mining-Aktivitäten ins Ausland führen. Dadurch bleibt selbst bei einem Verbot von POW-Blockchains und von Mining-Aktivitäten in einem Land die Gesamtblokchain unberührt. Außereuropäische Miner blieben auch nach einem entsprechenden lokalen Verbot weiterhin aktiv.

Daher wurde von einem entsprechenden allgemeinen Verbot von POW vorliegend abgesehen. Stattdessen wurden Betätigungsverbote für das Mining bzw. das Angebot von Dienstleistungen im Zusammenhang mit POW-basierten Kryptowerten diskutiert.

Dabei hat die Analyse des **Mining-Verbots** ergeben, dass mit einer solchen Maßnahme lediglich dann positive Umweltwirkungen verbunden sein könnten, wenn die europäischen bzw. deutschen Miner ihre Mining-Aktivitäten ersatzlos aufgeben würden. Bereits zum jetzigen Zeitpunkt entfällt nur ein kleiner Teil der Mining-Aktivitäten (z.B. bei Bitcoin) auf die EU. Die Einstellung der Mining-Aktivitäten in der EU bzw. Deutschland hätten folglich in einem globalen Kontext nur marginale positive Auswirkungen. Ein Mining-Verbot würde voraussichtlich zu einer Verlagerung des Mining ins Ausland führen (vgl. auch die Ausführungen zum Verbot in China, oben). Bei einer Verlagerung oder Verschiebung der Mining-Aktivitäten ins Ausland würden **neutrale** oder gar **negative Umweltwirkungen** entstehen. Das Verbot des Mining wäre daher nicht unmittelbar geeignet zum Ziel eines nachhaltigeren Einsatzes von Blockchain beizutragen.

Im Zusammenhang mit dem Verbot könnte eine politische Signalwirkung diskutiert werden. Es würde verdeutlichen, dass die Emissionen, die durch das Mining entstehen, in Widerspruch zu den Nachhaltigkeitszielen stehen können. Durch das Verbot könnten weitere Länder angeregt werden diesem Weg zu folgen. Inwiefern und wann eine solche Signalwirkung erfolgreich wäre, ist jedoch unklar.

Ein Verbot von POW-Mining ist effizient, wenn die durch POW-Mining verursachten externen Kosten so erheblich sind, dass das volkswirtschaftliche Optimum die Beendigung dieser Aktivität erfordert. Ist dies nicht der Fall, dann ist ein Verbot von POW mit **erheblichen Eingriffen in den Markt** und als solcher mit erheblichen Kosten verbunden.

Neben der Wirksamkeit und der Effizienz der Maßnahme ist für deren Bewertung auch ihre **Umsetzbarkeit** zu berücksichtigen. Unter praktischen Gesichtspunkten ließe sich ein *Verbot des Minings* relativ einfach umsetzen. Miner sind auf physische Infrastruktur (z.B. Kühlsysteme, Rechensysteme, Gebäude) angewiesen. Zumindest größere Miner könnten daher ermittelt und das Mining-Verbot durchgesetzt werden. Hinsichtlich der politischen Umsetzbarkeit ist zu beachten, dass ein entsprechendes Verbot im Rahmen des Gesetzgebungsverfahrens zur MiCA-VO bereits im Europäischen Parlament diskutiert und im Ergebnis abgelehnt wurde.

Aus rechtlicher Sicht wirft ein solches Verbot die Frage der Grundrechtskonformität. Bei einem Verbot von POW könnte es sich um einen Eingriff in die Berufsfreiheit der Miner (Art. 12 GG bzw. im europäischen Kontext Art. 15, 16 GRCh) handeln. Die Eröffnung des Schutzbereichs des Art. 12 GG verlangt, dass die betroffene Tätigkeit ein Beruf ist, d.h. eine „auf Dauer angelegte Tätigkeit, die der Schaffung und Erhaltung einer Lebensgrundlage dient.“ (vgl. stellvertretend BVerfG Beschl. v. 23.03.2022 - 1 BvR 1187/17, BVerfGE 161, 63 Rn. 43; Kämmerer, 2021, Art. 12 GG Rn. 27). Die Einordnung des Berufs in ein gesetzlich vordefiniertes oder traditionelles Berufsbild ist nicht erforderlich, da der Begriff des Berufs „entwicklungsoffen“ zu verstehen ist und sich an Wandlungen in der Erwerbsswelt anpassen muss (Remmert, 2024, Art. 12 GG Rn. 85 ff.; Kämmerer, 2021, Art. 12 GG Rn. 28 f.). Das gilt insbesondere für Berufe, „die aufgrund der fortschreitenden technischen, sozialen oder wirtschaftlichen Entwicklung neu entstanden sind“ (vgl. BVerfG Beschl. v. 07.03.2017 - 1 BvR 1314/12, BVerfGE 145, 20 Rn. 120; BVerfG Beschl. v. 23.03.2022 - 1 BvR 1187/17, BVerfGE 161, 63 Rn. 43) Der Grundrechtsberechtigte darf auch „untypische Betätigungsformen als Beruf zu wählen“ (stRspr vgl. BVerfG Urt. v. 13.02.1964 - 1 BvL 17/61 u.a., BVerfGE 17, 232 (241); BVerfG Beschl. v. 23.03.2022 - 1 BvR 1187/17, BVerfGE 161, 63 Rn. 43). Der andernfalls statische Grundrechtsschutz wäre mit dem grundgesetzlichen Menschenbild nicht zu vereinbaren (Kämmerer, 2021, Art. 12 GG Rn. 29). Nicht als Beruf geschützt sind bloße Hobbyaktivitäten, die nicht zur Schaffung und dem Erhalt der Lebensgrundlage beitragen können, weil sie kein Auskommen des Grundrechtsträger sichern können (Kämmerer, 2021, Art. 12 GG Rn. 36).

Soweit das Kryptomining mithin ein hinreichendes Ausmaß erlangt, handelt es sich um eine berufliche Betätigung des Grundrechtsträgers, da das Mining auf die Erzielung eines Einkommens abzielt. Auf die tatsächliche Einkommenserzielung kommt es bei Art. 12 GG nicht an. Bei dem Beruf des "Kryptominers" handelt es sich gerade um eine solche neue berufliche Betätigung, die durch neue technische Rahmenbedingungen entsteht. Folglich ist das Kryptomining als Beruf von Art. 12 GG geschützt, sofern es ein hinreichendes Volumen erreicht. Bloßes Hobby-Mining ist nicht durch Art. 12 GG geschützt, fällt aber in den Schutzbereich der allgemeinen Handlungsfreiheit.

Ein Verbot des Mining würde in diesen Schutzbereich mit berufsregelnder Tendenz eingreifen und wäre somit grundrechtlich rechtfertigungsbedürftig. Vor dem Hintergrund der Rechtsprechung des BVerfG zur intertemporalen Freiheitssicherung und dem Verfassungsrang des Klimaschutzes (vgl. 5.1.1) könnte ein solcher Eingriff jedoch gerechtfertigt werden. Fraglich ist lediglich die Eignung eines solchen Verbots zur Erreichung des legitimen Zwecks. Betrachtet man hierbei die globale Wirkung eines Verbots des Mining, so wäre ein solches nationales bzw. europäisches Verbot ungeeignet das globale Ziel unmittelbar zu erreichen (s. oben). National wäre aber ein solches Verbot durchaus geeignet das Ziel der Klimaneutralität zu fördern, da durch das Verbot des Mining entsprechende energieintensive Betätigungen untersagt würden. Das BVerfG hat klargestellt, dass aus der auf Deutschland beschränkten Wirkung einer Maßnahme kein Argument gegen ihre Eignung zur Erreichung des Zieles "Klimaschutz" folgt (BVerfG Beschl. v. 24.03.2021 - 1 BvR 2656/18, 78, 96, 288/20, BVerfGE 157, 30 Rn. 250). Daher ist allein die nationale Wirkung für die Betrachtung der Geeignetheit entscheidend. Betrachtet man lediglich die Auswirkungen der Maßnahme in Deutschland, so wäre sie durchaus geeignet die Erreichung des Zieles "Klimaschutz" zu fördern. Eine solche Maßnahme wäre wohl auch angemessen, da sie zielgenau eine Aktivität betrifft, die aufgrund der erheblichen Energieaufwände mit nicht unbeträchtlichen Treibhausgasemissionen verbunden ist. Zusammenfassend stehen grundrechtliche Bedenken einem Verbot von POW daher voraussichtlich nicht entgegen.

#### 5.4.2 Verbot des Besitzes und des Handels von POW-basierten Kryptowerten

Alternativ zu einem isolierten Verbot des Mining könnte auch (zusätzlich) ein Verbot des Besitzes, des Handels und spezifischer Dienstleistungen im Zusammenhang mit POW-basierten Kryptowerten in Betracht gezogen werden (vgl. so auch der Vorschlag von Holl, 2023).

##### Ausgestaltung der Maßnahme

Ein umfassenderes Verbot des Besitzes und Handels mit Kryptowerten sowie spezifischer Dienstleistungen würde das **Anbieten von Kryptowerte-Dienstleistungen** in Bezug auf bestimmte POW-basierte Kryptowerte untersagt, wie bspw. die Verwahrung von Kryptowerten für Kunden, Beratungsdienstleistungen, den Betrieb von Handelsplattformen in Bezug auf POW-basierte Kryptowerte, Transfer- oder Umtauschdienstleistungen oder das Kommissionsgeschäft mit POW-basierten Kryptowerten. Dieses Verbot würde sich ebenfalls auf Finanzprodukte basierend auf diesen POW-basierten Kryptowerten, wie zum Beispiel Bitcoin ETFs (Exchange Traded Funds), ausdehnen.

Ein entsprechendes Verbot müsste für alle Dienstleister gelten, die ihre Dienstleistungen auf dem europäischen Markt anbieten (sog. Marktortprinzip), unabhängig von ihrem tatsächlichen Sitz.

##### Anreize und Umweltwirkung

Die Akteure können unterschiedlich auf ein Verbot als ordnungsrechtliche Maßnahme **reagieren**: Sie können die Maßnahme befolgen, ihr ausweichen oder gegen eine solche

Maßnahme verstoßen. Der Fall eines Verstoßes gegen die Maßnahme soll vorliegend nicht betrachtet werden.

Im Falle der **Befolgung des Verbots** des Angebots von Dienstleistungen im Zusammenhang mit POW-basierten Kryptowerten würden die Dienstleister ihre Aktivitäten in Europa bzw. Deutschland einstellen. Die **Verlagerung der Aktivitäten** aus dem Anwendungsbereich des Verbots in andere Jurisdiktionen wäre bei einem Verbot, das an das Angebot der Dienstleistung auf dem europäischen Markt anknüpft, aussichtslos. Das Verbot würde auch für Anbieter mit Sitz außerhalb der EU bzw. Deutschlands Geltung beanspruchen. Entsprechende Regelungen sind aus anderen Rechtsakten mit Digitalbezug bekannt (vgl. Art. 2 Abs. 1 MiCA-VO, Art. 3 DS-GVO).

Es ist zu erwarten, dass sich durch das Verbot des Besitzes, Handels und Angebots von Kryptowerte-Dienstleistungen das **Anlagevolumen und die Nachfrage** in POW-basierte Kryptowerte **verringern** würde. Dies würde zu einer Verringerung der Nachfrage führen. Aufgrund der verringerten Nachfrage nach POW-basierten Kryptowerten könnte sich dann bei gleichbleibendem Angebot deren Preis verringern.<sup>94</sup>

Die **Wirkung** einer solchen Maßnahme nicht nur auf Deutschland bzw. die EU begrenzt. Vielmehr würde sich die Maßnahme auch global durch eine entsprechende Nachfrageverringering am Markt bemerkbar machen. Die globale Wirkung eines solchen Verbots steigt mit dem Anteil der deutschen bzw. europäischen Anlegenden am globalen Markt für POW-basierte Kryptowerte. Je geringer der Anteil, desto geringer die Auswirkungen am Markt.

Aus diesen Preiswirkungen können sich dann auch **Folgen für die Mining-Aktivitäten der Miner** außerhalb Europas ergeben. Die Rentabilität der Miner hängt vom Preis der POW-basierten Kryptowerte ab. Die Rewards für das Mining neuer Blocks und die Transaktionsgebühr sind die wesentlichen Einnahmequellen der Miner. Bei gleichbleibenden Rewards und Transaktionsgebühren für das Erstellen eines Blocks würden daher bei einem sinkenden Preis der Kryptowerte die Einnahmen der Miner sinken.

Bei sinkenden Einnahmen der Miner ist zu erwarten, dass Miner mit höheren Kosten aus dem Markt gedrängt werden. Dadurch kann sich der **Energieaufwand** und damit die **Treibhausgasemissionen reduzieren**. Von einem solchen Verbot wären positive Umweltwirkungen zu erwarten, sofern dem Anteil der europäischen Anlegenden am Markt hinreichendes Gewicht zukommt.

### **Bewertung der Maßnahme**

Bei einem **Verbot des Besitzes und des Handels** von POW-basierten Kryptowerten wären **positive Umweltwirkungen** zu erwarten. Die Intensität dieser Auswirkungen und damit die Wirksamkeit dieser Maßnahme hängt dabei von der Bedeutung der europäischen bzw. deutschen Anleger für den globalen Markt für POW-basierte Kryptowerte ab. Die Wirkung der Maßnahme tritt nur dann ein, wenn sich die Abnahme der Nachfrage von Seiten der europäischen bzw. deutschen Anlegenden auf den globalen Preis auswirken würde.

Außerdem muss die **politische Signalwirkung**, die von einem solchen Verbot ausginge, beachtet werden. Durch das umfassende Verbot des Besitzes, Handels und Dienstleistungen im

---

<sup>94</sup> Gleichzeitig ist allerdings auch zu beachten, dass die europäischen Bestandsanleger im Zuge eines solchen Verbotes innerhalb eines kurzen Zeitraums gezwungen wären, ihre POW-basierten Kryptowerte zu veräußern. Infolgedessen dürfte innerhalb dieses Zeitraums bei gleichbleibender Nachfrage auf dem globalen Markt nach POW-basierten Kryptowerten der Preis erheblich sinken, was wiederum dazu führt, dass die Anlage in POW-basierte Kryptowerte für Anlegerinnen aus anderen Weltregionen, in denen kein entsprechendes Verbot erlassen wurde, attraktiver würde. Dies könnte im Ergebnis dazu führen, dass die Preiseffekte zumindest ansatzweise dem erwünschten Effekt entgegenwirken.

Zusammenhang mit POW-basierten Kryptowerte in der EU würde verdeutlichen, dass die Emissionen, die durch das Mining entstehen, als unvereinbar mit den Nachhaltigkeitszielen der EU betrachtet werden. Durch ein Verbot wird so ein gewisses politisches Signal gesetzt und weitere Länder angeregt diesen Weg zu folgen und ebenfalls Maßnahmen gegen umweltschädliche Praktiken zu ergreifen (sog. Brüssel-Effekt).

Es ist für den europäischen Markt von einer hohen Wirkung auf das Nachfrageverhalten auszugehen. Weil der Anteil der EU-Investoren am weltweiten Markt für Kryptowerte von nicht unerheblicher Bedeutung für die Nachfrage auf dem globalen Kryptomarkt ist, ist im Ergebnis von **Auswirkungen** auf die Nachhaltigkeit des Einsatzes von POW-Blockchain **weltweit** auszugehen.

Hinsichtlich der **Effizienz** der Maßnahme ist zu beachten, dass ein Verbot des Besitzes und Handels von POW-basierten Kryptowerten erhebliche Marktverzerrungen auf dem Markt der Dienstleister zur Folge hätte, da hier einzelne technologische Lösungen gegenüber anderen Lösungen benachteiligt werden. Es würden Handel, Besitz und Dienstleistungen im Zusammenhang mit POW-basierten Kryptowerten verboten, für die derzeit wohl eine Nachfrage am Markt besteht. Ein solches Verbot wäre somit mit indirekten Kosten verbunden, wenn den Dienstleistern ein Teil ihrer Geschäftsgrundlage entzogen wird. Alternative Maßnahmen, wie Zertifikatsysteme oder zweckgebundene Steuern mit denen die Akteure die Umweltfolgen ihres Handelns kompensieren können, könnten stattdessen effizienter sein, denn sie überlassen es den Marktteilnehmern, wie diese optimal Umweltwirkungen reduzieren können. Sofern diese alternativen Maßnahmen sich jedoch als untauglich erweisen sollten, können auch ordnungsrechtliche Maßnahmen gerechtfertigt sein.

Aus praktischer Sicht ließe sich ein solches Verbot im Hinblick auf die Dienstleister einfach **umsetzen**. Die Kryptowerte-Dienstleister sind nach dem KWG bzw. der MiCA-VO regelmäßig erlaubnisbedürftig und daher den Behörden bekannt. Durch eine Änderung des KWG und den Entzug dieser Erlaubnis könnten diese Dienstleistungen verboten werden. Es stellen sich aber auch hier die zuvor beschriebenen politischen Schwierigkeiten auf der europäischen Ebene, da die Anlageklasse der Kryptowerte und im Besonderen von Bitcoin und Bitcoin ETFs in den letzten Monaten stark an Bedeutung zugenommen hat und von einem Verbot im Rahmen von MiCA bereits abgesehen wurde. Durchsetzungsschwierigkeiten bestünden jedoch hinsichtlich des Verbots des Handels und des Besitzes von POW-basierten Kryptowerten. Aufgrund der Dezentralität wäre eine Anlage in diese Kryptowerte weiterhin praktisch möglich. Etwaige Verstöße sind aufgrund der Pseudonymität der Blockchain nur erschwert durchsetzbar, da sie mit einigem Ermittlungsaufwand einhergehen. Aufgrund des zu erwartenden hohen Befolgungsgrades des Verbotes, gerade auch durch professionelle Akteure, erscheint dieser Aspekt aber vernachlässigbar.

### 5.4.3 Umweltverträglichkeitsprüfung für Mining-Farmen

Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVP) sind ein bewährtes Mittel zur Berücksichtigung von Umweltbelangen in Planungs- und Genehmigungsverfahren. Unter Umständen käme eine solche UVP auch für Mining-Farmen in Betracht.

#### Ausgestaltung der Maßnahme

Eine **Pflicht für die Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung** nach dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG)<sup>95</sup> bei der Errichtung bzw. dem Betrieb eines Rechenzentrums, das für das Mining genutzt werden soll (sog. Mining-Farmen), könnte durch

---

<sup>95</sup> Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung idF v. 18.03.2021 (BGBl. I S. 540), zuletzt geändert durch Art. 10 des Gesetzes v. 22.12.2023 (BGBl. 2023 I Nr. 409).

eine **Ergänzung der Anlage 1 des UVPG** eingeführt werden. Mit einer Pflicht zur Durchführung einer UVP ginge die Verpflichtung zur Ermittlung, Beschreibung und Bewertung der erheblichen Auswirkungen eines Vorhabens auf die in § 2 Abs. 1 UVPG genannten Schutzgüter (Menschen, insb. menschliche Gesundheit; Tiere, Pflanzen und die biologische Vielfalt; Fläche, Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft; kulturelles Erbe und sonstige Sachgüter; sowie entsprechende Wechselwirkungen zwischen den beschriebenen Schutzgütern) einher (vgl. § 3 UVPG). Eine solche Verpflichtung wäre als weitere **Verfahrensstufe** in ein bestehendes **Genehmigungsverfahren** einzubauen, ohne dass sich daraus materielle Anforderungen an die Zulässigkeit eines Vorhabens ergeben würden (Führ/Dopfer/Bizer, 2009, S. 59; Kment, 2012, Rn. 7 f.). Als bauliche Anlagen sind Mining-Farmen bei der Errichtung in der Regel baugenehmigungspflichtig. Es ist daher ein Baugenehmigungsverfahren durchzuführen. Im Rahmen eines solchen Baugenehmigungsverfahrens wäre die UVP als weiterer Verfahrensschritt zu berücksichtigen (§ 2 Abs. 6 UVPG).

Das UVPG listet in der Anlage 1 die gem. § 1 Abs. 1 Nr. 1 UVPG UVP-pflichtigen Vorhaben auf. Ein Vorhaben i.S.d. UVPG meint dabei sowohl Neuvorhaben als auch Änderungsvorhaben (§ 2 Abs. 4 UVPG). Rechenzentren sind in der Anlage 1 nicht aufgelistet. Eine entsprechende Umweltverträglichkeitsprüfungspflicht (UVP-Pflicht) könnte durch eine **Ergänzung** der in Anlage 1 genannten Vorhaben erreicht werden, indem eine UVP-Pflicht für die Errichtung und den Betrieb einer Mining-Farm ab dem Erreichen eines bestimmten Schwellenwertes eingeführt wird. Als Schwellenwert könnte beispielsweise die geplante installierte Rechenkapazität in Terahash pro Sekunde oder der erwartete Energieaufwand einer Anlage herangezogen werden. Bei der Festlegung der Reporting-Schwelle müsste dabei sichergestellt werden, dass sie nicht durch eine starke geografische Dezentralisierung der Mining-Geräte umgangen werden kann. Sie müsste zudem einfach anzupassen sein, da sich die ASIC-Technologie ständig weiterentwickelt und je nach Anknüpfungspunkt die Schwelle schnell überholt sein könnte. Bei der Auswahl des Schwellenwertes sollte eine kohärente Lösung zu den bestehenden Schwellenwerten der Anlage 1 UVPG gewählt werden. Dafür sollte sich der Schwellenwert an den bestehenden Schwellen orientieren. Darüber hinaus müsste ein solcher Schwellenwert sicherstellen, dass nur Anlage ab einer bestimmten Größe der UVP-Pflicht unterfallen, um den bürokratischen Aufwand für kleine Anlagen möglichst gering zu halten.

Rechtlich zweifelhaft ist die Anknüpfung einer solchen Anpassung des UVPG an Mining-Farmen als besondere Ausgestaltung eines Rechenzentrums. Mining-Farmen unterscheiden sich im Wesentlichen durch den Zweck der Nutzung der darin gebündelten Rechenkapazitäten von Rechenzentren, die für andere Zwecke genutzt werden. Beiden gemeinsam ist im Grundsatz aber ihr hoher Energieaufwand. § 2 Abs. 4 UVPG knüpft im Grundsatz lediglich an die Errichtung und den Betrieb einer technischen Anlage oder den Bau einer solchen Anlage im Allgemeinen an. Unberücksichtigt bleibt grundsätzlich der Zweck der Nutzung der technischen Anlage. Eine solche Regulierungsmaßnahme könnte sich daher dem Vorwurf der systemischen Inkohärenz aussetzen.

Von Mining-Farmen können aufgrund des hohen Energie- und Wasserverbrauchs negative Auswirkungen auf die Schutzgüter Klima und Wasser erwartet werden. Zwar entstehen die negativen Auswirkungen auf das Klima mangels unmittelbarer Energieumwandlung in der Mining-Farm nur mittelbar beim jeweiligen Energielieferanten. Etwas anderes gilt aber für das Schutzgut Wasser. Zur Kühlung der Recheninfrastruktur werden Kühlbäder eingesetzt, die zu Wasserverbrauch führen. Durch die Rückführung des erwärmten Wassers in den natürlichen Wasserkreislauf kann es dann zu einer Erhitzung der lokalen Gewässer mit negativen Umweltfolgen kommen. Um diese Umweltfolgen abzumildern können daher kompensatorische

Maßnahmen in der UVP geprüft werden, wie beispielsweise die Nutzung der Abwärme zum Heizen (sog. Fernwärme). Diese Aspekte könnten in einer UVP berücksichtigt werden.

### Anreize und Umweltwirkungen

Die Anordnung einer UVP-Pflicht für Mining-Farmen ist ein **ordnungsrechtliches Instrument** (vgl. 5.3.1). Die Durchführung einer UVP wäre im Rahmen des Genehmigungsverfahrens zwingende Voraussetzung für den Erlass einer Genehmigung. Durch die UVP wird ein öffentlicher Informationsbedarf im Zusammenhang mit dem Verfahren befriedigt, indem der Vorhabenträger Informationen über die durch das Vorhaben beeinträchtigten Umweltbelange **transparent** macht (Kment, 2012, Rn. 8). Durch die UVP kann die Einhaltung bestimmter Standards im Rahmen des Genehmigungsverfahrens sichergestellt werden.

Darüber hinaus wurde für Umweltverträglichkeitsprüfungen auch nachgewiesen, dass mit ihnen eine positive Vorwirkung auf den/die Unterlagen-Ersteller, d.h. den zur UVP-Verpflichteten einher geht. Regelmäßig führe die Durchführung einer UVP dazu, dass der Berücksichtigung von Umweltbelangen in der Planung eines Vorhabens größere Bedeutung beigemessen wird (Früh/Dopfer/Bizer, 2009, S. 62). So können bestimmte Umweltauswirkungen des Vorhabens bspw. erst durch die UVP ermittelt und transparent gemacht werden. Die UVP führt daher erst dazu, dass solche Belange überhaupt im Planungs- bzw. Baugenehmigungsverfahren berücksichtigt werden.

Daraus könnten positive Umweltwirkungen folgen, indem die Vorhabenträger auf umweltfreundlichen Alternativen im Betrieb der Mining-Farmen setzen würden. Durch die UVP können Umweltbelange umfassender im Planungs- oder Genehmigungsverfahren berücksichtigt werden. Bezogen auf den generierten Elektroschrott ist denkbar, dass sich die Mining-Farmen verpflichten könnten, unbenötigte Hardware umweltgerecht zu entsorgen oder, soweit möglich, zu recyceln. Die Wirkung der UVP beschränkt sich dabei jedoch zumeist auf die Einhaltung gesetzlicher Standards. Darüberhinausgehende Effekte können nicht unterstellt werden.

Auf der anderen Seite wäre mit einer solchen Maßnahme eine erhebliche Verschärfung der **bürokratischen Lasten für die Vorhabenträger** verbunden. Die Durchführung einer UVP ist kosten- und zeitintensiv und kann zu einer erheblichen Verzögerung eines UVP-pflichtigen Projekts führen. Außerdem kann sich durch eine UVP-Pflicht gem. § 1 Abs. 1 Nr. 1 UmwRG der Kreis der Klageberechtigten gegen ein solches Vorhaben erweitern. Nach dem UmwRG können auch Umweltverbände ohne individuelle Betroffenheit gegen Vorhaben vorgehen. Die UVP-Pflicht kann daher ggf. gar **prohibitive Wirkung** haben, wenn dadurch das Klagerisiko der Vorhabenträger verschärft wird.

Unter Umständen könnte das dazu führen, dass Vorhabenträger von der Errichtung einer Mining-Farm in Deutschland aufgrund des **hohen bürokratischen Aufwands** absehen. Stattdessen könnten sich die Vorhabenträger zur Realisierung des Vorhabens im Ausland entschließen. Je nach Wahl des Standorts könnten von einer UVP-Pflicht gar **negative Umweltwirkungen** ausgehen, wenn die Vorhabenträger sich für einen Standort mit einem umweltbelastenderen Strommix entscheiden würden.

### Bewertung der Maßnahme

Die **Wirksamkeit** einer UVP-Pflicht wäre immer von der Reichweite der gesetzlichen Anforderungen an die Umweltverträglichkeit eines Vorhabens abhängig. Positive Umweltwirkungen würden sich dann ergeben, wenn die Akteure aufgrund der gestiegenen Anforderungen auf umweltfreundlichen Alternativen im Betrieb setzen würden oder von einer Investition insgesamt absehen würden. Auf der anderen Seite ist es aber auch denkbar, dass Mining-Farmen, die eine Ansiedlung in Deutschland oder in der EU anstreben, sich mehr

bemühen würden, mithilfe von Innovationen den Anforderungen einer Umweltverträglichkeitsprüfung gerecht zu werden. Dadurch würden Innovationen gefördert, die womöglich nicht nur Auswirkungen auf die europäischen Mining-Farmen hätten, sondern weltweit ausstrahlen könnten. Letztlich führt die UVP-Pflicht jedoch nicht zu strengeren gesetzlichen Anforderungen, sondern trägt nur zur Durchsetzung der bereits bestehenden gesetzlichen Pflichten bei, indem die Umweltauswirkungen im Genehmigungsverfahren transparent gemacht werden. Von der Maßnahme können mithin zwar positive Wirkungen auf das Ziel einer nachhaltigen Nutzung von Blockchain ausgehen. Diese Wirkungen gehen jedoch nicht über die bereits bestehenden gesetzlichen Pflichten hinaus. Von einer solchen Maßnahme wäre daher nur ein geringer eigenständiger Einfluss auf die nachhaltige Nutzung von Blockchain zu erwarten.

Eine UVP-Pflicht für Mining-Farmen wäre mit hohen Bürokratiekosten verbunden. Die UVP müsste durch eine staatliche Stelle im Rahmen des behördlichen Genehmigungsverfahrens berücksichtigt werden.

Durch den zusätzlichen bürokratischen Aufwand bei der Errichtung von Rechenzentren könnten Investitionen in die dringend benötigten digitalen Infrastrukturen unattraktiv werden. Dadurch könnte das Ziel des Ausbaus der europäischen digitalen Souveränität behindert werden. Die Kosten stehen daher nicht im Verhältnis zum erwarteten Nutzen der Maßnahme.

Bei der **Umsetzung** einer solchen Maßnahme sind nicht unerhebliche **rechtlichen Hürden** zu beachten. Das UVPG dient der Umsetzung der Richtlinie 2011/92/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13.12.2011 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten in der Fassung der Richtlinie 2014/52/EU (ABl. L 124 vom 25.4.2014, S. 1) und der Richtlinie 2001/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Juni 2001 über die Prüfung der Umweltauswirkungen bestimmter Pläne und Programme (ABl. L 197 vom 21.7.2001, S. 30). In dieser Richtlinie werden Mining-Farmen und Rechenzentren nicht als UVP-pflichtige Vorhaben genannt. Die Mitgliedsstaaten sind zur **überschießenden Umsetzung von EU-Richtlinien** befugt, sofern sie dadurch nicht den Vorgaben der Richtlinie widersprechen (Nettesheim, 2023, Art. 288 Rn. 131). Bei der Aufnahme von Mining-Farmen in den Vorhabenkatalog der Anlage 1 des UVPG wäre daher zu berücksichtigen, inwiefern der deutsche Gesetzgeber zu einer solchen Maßnahme berechtigt wäre oder ob es einer europäischen Anpassung der Richtlinie bedürfte.

Darüber hinaus ist zu beachten, ob eine gesonderte Regelung für Mining-Farmen überhaupt statthaft ist oder stattdessen eine **UVP-Pflicht allgemein für Rechenzentren** aufgenommen werden müsste. Im Grundsatz sind sowohl Mining-Farmen als auch Rechenzentren mit einem erheblichem Energieaufwand verbunden. Die Zulässigkeit einer Differenzierung nach dem Einsatzzweck der aufgebauten Rechenkapazitäten ist fraglich und könnte dem System des UVPG widersprechen.

Wäre man aufgrund gleichheitsrechtlicher Erwägungen aber gezwungen eine allgemeine UVP-Pflicht für alle Rechenzentren einzuführen, so wäre dies **politisch** wohl nur schwer umsetzbar. Vor dem Hintergrund einer politisch wünschenswerten weiteren Digitalisierung und der zunehmenden Bedeutung von Rechenzentren kann der Aufbau weiterer europäischer Infrastruktur und Rechenzentren als wesentlicher Schritt zur europäischen digitalen Souveränität angesehen werden. Dieses Ziel würde durch zusätzliche bürokratische Hürden aber konterkariert.

#### 5.4.4 Umweltlabel für Blockchains

Eine weitere potenzielle Maßnahme zur Regulierung stellt ein Umweltlabel für Blockchains dar (Krempf, 2022). Bei einer solchen Maßnahme handelt es sich um ein **informatorisches Instrument** (vgl. 5.3.2). Es soll Transparenz über die Umweltauswirkungen von Blockchains schaffen und Informationsdefizite bei Privatanlegenden ausgleichen.

##### Ausgestaltung der Maßnahme

Ein Umweltlabel für Blockchains oder Blockchain-Anwendungen könnte in die von der EU-Kommission vorgeschlagenen neuen **Ökodesign-Verordnung** aufgenommen werden. Bisher ist der Anwendungsbereich der Ökodesign-Verordnung aber auf physische Waren beschränkt (Art. 1 Abs. 2 Ökodesign-VO-Entwurf, vgl. auch Mittwoch, 2024, S. 62). Alternativ wäre auch eine entsprechende **Anpassung der White-Paper-Pflicht in der MiCA-Verordnung** denkbar.

Für ein Umweltlabel würden Blockchains in verschiedene Klassen eingeteilt. Die Einteilung wäre von den Umweltauswirkungen des jeweiligen Blockchain-Protokolls abhängig. Für die Einteilung könnte die Energieeffizienz, die geschätzten Treibhausgasemissionen und der Ressourcenaufwand berücksichtigt werden. Dafür müssten für jede Klasse Vergleichswerte festgelegt werden. Anhand der Vergleichswerte würde dann eine Einordnung der Blockchains in eine Klasse vorgenommen. Aufbauend auf dieser Einstufung erhielte eine Blockchain ein bestimmtes Umweltlabel (z.B. Ampelsystem von grün bis rot, vgl. EU-Energielabel). Um die **Vergleichbarkeit** zwischen den einzelnen Blockchains **sicherzustellen**, müssen übergreifende Bewertungskriterien gefunden werden, die sich auf eine Vielzahl von Blockchains anwenden lassen.

Ein solches Label könnte auf Antrag von einer Behörde vergeben werden. Alternativ kommt auch eine **rein private Vergabe durch zertifizierte Organisationen** in Betracht. Diese Möglichkeit der Durchsetzung ist aufgrund der erwarteten geringeren administrativen Kosten einer behördlichen Vergabe des Labels vorzuziehen. Dadurch würde der administrative Aufwand für die öffentlichen Stellen verringert, die nur einige wenige zentrale Organisationen zertifizieren müssten. Die Prüfung der konkreten Anträge im Einzelfall für die Vergabe des Labels wird den privaten Stellen überlassen.

Diese Organisationen müssten bestimmte Voraussetzungen einer Zertifizierung erfüllen. Sie müssten beispielsweise von den Verpflichteten strukturell unabhängig sein und bei einer Behörde ihre Qualifikation und Unabhängigkeit nachweisen. Durch solche zertifizierten Organisationen könnten die Einhaltung übergreifender Standards für das Umweltlabel und damit die Vergleichbarkeit sichergestellt werden. Die Organisationen könnten als Erfahrungsspeicher zur Erstellung eines Umweltlabels dienen. Dadurch würden möglicherweise mit der Zeit die Schwierigkeiten der Informationsbeschaffung abgebaut, da die Organisationen langfristig einen Informationsbestand aus unterschiedlichen Quellen aufbauen könnten. Die Organisation würde auf der Grundlage der Informationen, die von den zur Bereitstellung eines Labels Verpflichteten übermittelt werden, eine Entscheidung über die Einordnung der Blockchain/der Blockchain-Anwendung vergeben.

Eine Schwierigkeit bei der Ausgestaltung der Maßnahme liegt in der **Auswahl der Verpflichteten**. Es ist zu klären, wer verpflichtet sein soll ein Umweltlabel für eine bestimmte Blockchain/Blockchain-Anwendung zu beantragen und bereitzustellen. Bei Blockchains gibt es keine zentrale Stelle, die alle Informationen bereitstellen kann und die Verantwortung für das Modell trägt. Um eine Bewertung der Umweltauswirkungen einer Blockchain zu ermöglichen, werden aber zahlreiche Informationen über den Energieaufwand, die verwendeten Energiequellen und den Ressourcenaufwand (z.B. Kühlwasser) der gesamte

Blockchain benötigt. Diese Informationen können aufgrund der dezentralen Struktur der Blockchain nur geschätzt werden und sind entsprechend nicht einfach zu beschaffen.

Um diese Informationsdefizite auszugleichen, müssten für die Bewertung unter Umständen bestimmte Annahmen (z.B. zum verwendeten Strommix) ausreichen, wenn keine genauen Angaben von den Verpflichteten gemacht werden können. Dadurch reduziert sich dann jedoch die Genauigkeit des Labels. Die Annahmen sind daher so zu wählen, dass es zu keiner zu starken Verzerrung gegenüber der Realität kommt. Im Ergebnis dürfte aber eine weniger detaillierte Einschätzung besser sein als gar keine Einschätzung, da zumindest der Größenordnung nach Aussagen möglich sind. Der Informationsgehalt verbessert sich dann auch bei einem ungenauen Label gegenüber dem Status quo.

Als zur Bereitstellung des Labels **Verpflichtete** kommen beispielsweise entsprechend der White-Paper-Pflicht in der MiCA-Verordnung **Emittenten von Kryptowerten** oder **Kryptowerte-Dienstleistende** in Betracht. Dabei wäre sicherzustellen, dass die Emittenten vorrangig und die Kryptowerte-Dienstleistenden nur subsidiär verpflichtet sind. Die Emittenten sind meist näher an der technischen Ausgestaltung und können die Informationen daher besser bereitstellen. Die Dienstleistenden sollen daher zur Bereitstellung des Umweltlabels nur dann verpflichtet sein, wenn kein Emittent vorhanden ist (z.B. bei Bitcoin). Durch die gesetzliche Pflicht würde die Bereitstellung des Umweltlabels zur zwingenden Voraussetzung für das Angebot der Dienstleistungen oder Kryptowerte in Deutschland bzw. der EU werden. Wollen ausländische Anbietende ihre Produkte auf dem europäischen bzw. deutschen Markt anbieten, so müssen sie ein Umweltlabel ausweisen.

Eine vergleichbare Pflicht könnte auch für andere Blockchain-Anwendungen als Kryptowerte für deren Entwickler (z.B. bei dezentralisierten Apps) aufgenommen werden. Bei permissioned Blockchain sollten die **Administratoren** zur Bereitstellung des Labels verpflichtet werden.

Es ist sicherzustellen, dass bei mehreren Verpflichteten die Einordnung derselben Anwendung einheitlich erfolgt. Um Widersprüche zu vermeiden, muss ein Austausch der Informationen zwischen den zertifizierten Organisationen ermöglicht werden. Dies wäre bspw. über eine zentrale Datenbank für alle vergebenen Labels möglich.

Neben der Pflicht zur Erstellung eines Umweltlabels sollte auch sichergestellt werden, dass die Umweltlabel den Betroffenen vor ihrer Entscheidung über den Erwerb der Kryptowerte oder der Nutzung einer Blockchain-Anwendung bereitgestellt werden. So könnten die Kryptowerte-Dienstleister und Kryptobörsen beispielsweise verpflichtet werden ihren Kunden das Label vor dem Erwerb eines bestimmten Kryptowertes zur Kenntnis zu geben. Indem die Anlegerinnen dann unmittelbar vor der Anlageentscheidung mit dem Label konfrontiert werden, werden sie in die Lage versetzt die Umweltwirkungen ihres Anlageverhaltens zu berücksichtigen.

### **Anreize und Umweltwirkungen**

Die Einführung eines Umweltlabels führt in erster Linie zu **Transparenz** über die Umweltfolgen einer Blockchain. Die **Anreizwirkung**, die mit einer solchen Maßnahme verbunden ist, hängt daher im Wesentlichen von der Sensibilität der Adressaten eines solchen Labels für Umweltschäden ab (Bengtsson et al., 2010, S. 11). Eine Verhaltensänderung ist nur dann zu erwarten, wenn die Marktteilnehmenden in der Lage sind die bereitgestellten Informationen zu verarbeiten und entsprechend zu handeln (Mittwoch, 2024, S. 64). Je eher bspw. ein Privatanlegende oder Blockchain-Nutzende die Folgen ihres Verhaltens für die Umwelt in seine Auswahlentscheidung mit einbezieht, desto größer sind die Wirkungen eines Umweltlabels einzuschätzen.

In der Vergangenheit hat das Konsumentenbewusstsein für Umweltschäden zugenommen, womit ein zunehmender Wandel des Konsumentenverhaltens hin zu nachhaltigen Produkten zu beobachten ist (vgl. auch Abschnitt 4.4.3). Entsprechende Untersuchungen von Drăgnoiu et al. (2023) haben ergeben, dass Anlegende, die im Vorfeld der Anlageentscheidung über den Energieaufwand von Kryptowerten aufgeklärt wurden, sich eher für einen energieeffizienteren Kryptowert entscheiden als für energieintensivere Produkte (Drăgnoiu et al., 2023). Dieses Bewusstsein der Anlegenden für den Konsum nachhaltiger Produkte kann sich der regulierende Gesetzgeber zu Nutze machen und eine "Nachhaltigkeitstransformation über den Hebel des Marktes" durch Informationspflichten anstoßen (Mittwoch, 2024, S. 66).

Der Einführung eines Umweltlabels für Blockchains käme daher eine ähnliche Wirkung zu wie den Informationspflichten über Umweltauswirkungen in der MiCA-VO (vgl. Abschnitt 4.4.3). Entgegen den Informationspflichten im Kryptowerte-Whitepaper wird durch ein solches Umweltlabel zwar der Detailgrad der Informationen verringert, gleichzeitig aber auch die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien durch Privatanlegende und nicht-professionelle Blockchain-Nutzende erleichtert. Bei den zahlreichen Informationen, die in den Kryptowerte-Whitepaper nach der MiCA-VO veröffentlicht werden sollen, kann es leicht zu einem sog. Information Overload für nicht-professionelle Anlegende kommen. Je nach Art der Informationsaufbereitung im Whitepaper werden nicht-professionelle Anlegende häufig nicht in der Lage sein die umweltbezogenen Informationen einzuordnen und zu bewerten. Demgegenüber wäre das Umweltlabel leicht verständlich. Um das Label zu verstehen, sind keine Vor-Kenntnisse der Adressaten über Umweltzusammenhänge notwendig. Außerdem sind vergleichbare Label den Verbrauchern bereits von anderen Produkten (z.B. Haushaltsgeräten) bekannt, sodass ein Wiedererkennungseffekt eintreten könnte. Daher ist die **Wirksamkeit** eines solchen Umweltlabel, gegenüber den **Informationen im White-Paper grundsätzlich höher einzuschätzen**.

Im Zentrum der bisherigen Auswirkungen stand das Verhalten von Privatanlegern und Verbrauchern. Um **professionelle Anleger** und **Unternehmen** für die Auswahl von energieeffizienteren Blockchains gewinnen zu können, sind **weitere Maßnahmen notwendig**. Bei professionellen Anlegerinnen ist allein aufgrund des Labels keine Verhaltensänderung zu erwarten. Sie sind meist bereits ohne Label gut über die Umweltwirkungen informiert. Entsprechende Anreize für die professionellen Anleger und Unternehmen können beispielsweise aus der EU-Taxonomie-VO folgen. Aus einem entsprechenden Umweltlabel, ggf. verbunden mit weiteren verpflichtenden Maßnahmen, könnte eine **Nachfrageverschiebung hin zu nachhaltigeren Blockchains** entstehen. Wie von Drăgnoiu et al. (2023) nachgewiesen kann es durch ein Umweltlabel zu einer Veränderung des Nachfrageverhaltens bei Privatanlegenden kommen. Mit einer solche Verlagerung des Investitionsvolumen auf energieeffizientere Blockchains, wären bei gleichbleibendem Angebot in der Folge durchaus positive Umweltwirkungen verbunden. Die Nachfrageverschiebung könnte sich beispielsweise in einem sinkenden Preis ausdrücken. Für Miner bzw. Validatoren wäre es in der Folge attraktiver sich auf die nachgefragten – nachhaltigeren – Blockchains zu verlagern oder die negativen Umweltwirkungen der Blockchains zu verbessern.

### **Bewertung der Maßnahme**

Die **Wirksamkeit** des Umweltlabels ist erheblich von der Sensibilität der Adressaten für Umweltauswirkungen ihres Verhaltens und deren Bereitschaft für die Umweltfolgen das eigene Verhalten zu verändern abhängig. Je geringer diese Bereitschaft der Nutzenden, desto kleiner das **Wirkungspotenzial** der Maßnahme. Daher sind die erwarteten positiven Umweltwirkungen nicht zwingend. Fehlt es an einer entsprechenden Sensibilität der Adressatinnen, wäre ein Umweltlabel wirkungslos. Wie gezeigt sprechen jedoch einzelne

Studienergebnisse dafür, dass die Anlegerinnen aufgrund der Transparenzpflichten ihr Verhalten ändern würden. In einem solchen Fall hätte ein Umweltlabel zumindest einen moderaten Einfluss auf das Anlageverhalten und könnte zu Verbesserungen bei der nachhaltigen Nutzung von Blockchain führen.

Die praktische **Umsetzbarkeit** eines solchen Umweltlabels wirft gerade während der Implementierungsphase einige Schwierigkeiten auf. Die Beschaffung der notwendigen Informationen dürfte für die Verpflichteten mit nicht unerheblichen **Schwierigkeiten und Kosten** verbunden sein. In einem dezentralen Netzwerk verfügt keine Stelle über alle Informationen und ist daher auf eine Zusammenarbeit mit den anderen – im Falle der Blockchain-Technologie pseudonymen – Akteuren bzw. Schätzungen angewiesen. Bei der Umsetzung muss darauf geachtet werden, dass ein solches Umweltlabel nicht missbraucht wird (Greenwashing). Das gilt insbesondere im Hinblick auf die Zulässigkeit von Annahme/Schätzungen, die tendenziell zu Gunsten der Betroffenen ausfallen könnten. Je weniger Schätzungen zugelassen werden, desto mehr verschärft sich aber die Schwierigkeit der Informationsbeschaffung.

Aus **Effizienzgesichtspunkten** ist zu beachten, dass die Maßnahme mit Kosten für die zur Bereitstellung des Labels verpflichteten Privaten verbunden wäre. Sie müssen Informationen beschaffen, die im dezentralen Blockchain-Netzwerk sehr verstreut und daher nicht leicht zu erlangen sind. Mit einer solchen Informationsbeschaffung sind teils erhebliche Kosten verbunden, weil bspw. private Dienstleister mit der Informationsbeschaffung beauftragt werden müssten. Je detaillierter die verlangten Informationen sind, desto höher werden diese Kosten (s. auch oben). Gleichzeitig ist die Wirksamkeit der Maßnahme aus Umweltschutzgesichtspunkten nicht sichergestellt. Zwar können Verhaltensänderungen erwartet werden, ob diese sich aber hinreichend am Markt niederschlagen ist nicht sichergestellt. Um die Effizienz der Maßnahme zu steigern, muss der Gesetzgeber daher darauf achten, dass die Maßnahme so ausgestaltet wird, dass ihre Umsetzbarkeit gesichert werden kann. Andernfalls kann die Maßnahme prohibitive Wirkung haben, die zu ineffizienten Folgen führen würde.

Der Anreiz zur Kooperation ist für die Nicht-Verpflichteten – insbesondere im Ausland – sehr gering, was der **Umsetzbarkeit** und **Wirksamkeit** der Maßnahme im Wege steht. Ein Anreiz zur Informationsoffenlegung kann aber dann bestehen, wenn die Blockchain-Developer erkennen, dass bei Nicht-Kooperation aus ihrer Sicht nachteilige Annahmen getroffen wurden. In einem solchen Fall würden die Developer Informationen bereitstellen, um die zu negativen Einschätzungen zu korrigieren.

Die Schwierigkeiten, die mit der Implementierung des Umweltlabels verbunden sind, hängen von der Ausgestaltung der Verpflichtung ab. Je detailliertere Berechnungen verlangt werden, desto schwieriger ist die Informationsbeschaffung für das Label. Sofern den Verpflichteten aber **typisierende Annahmen** zugestanden werden, um Informationsdefizite auszugleichen, können diese Schwierigkeiten überwunden werden. Darunter würde wiederum der Aussagegehalt des Labels leiden. Der Gesetzgeber muss daher eine **Abwägung zwischen Genauigkeit und Umsetzbarkeit** des Labels treffen.

Aus der Sicht der Verwaltungsbehörden ist der **administrative Aufwand** als gering einzuschätzen. Die Durchsetzung der Verpflichtung könnte weitestgehend den Privaten (sog. **Private Enforcement**) überlassen werden. Es wäre bspw. denkbar eine entsprechende Regelung durch privatrechtliche Haftungstatbestände oder wettbewerbsrechtliche Unterlassungsansprüche aufgrund irreführender geschäftlicher Handlungen (§ 5 UWG) abzusichern. Die Konkurrenten und Verbraucher würden dann eigenständig die Einhaltung der Verpflichtung gegenüber den Verpflichteten einfordern.

Außerdem würde es sich um eine wenig eingriffsintensive Maßnahme handeln, die auf eine **privatautonome Entscheidung** der Akteure setzt. Es wäre den Nutzer und Anlegerinnen überlassen, für welche Produkte sie sich bei ihrer Auswahl entscheiden. Dabei könnten sie neben den Umweltauswirkungen auch andere Aspekte berücksichtigen, wie bspw. Sicherheitserwägungen. Umweltschädigendes Verhalten würde den Akteuren nicht verboten. Sie werden lediglich über die Umweltwirkungen informiert.

Allerdings ist zu beachten, dass auch aus einem Umweltlabel **prohibitive Wirkungen** entstehen können. Droht bei fehlerhaften Informationen eine Haftung, so kann die Informationspflicht dazu führen, dass das mit der Informationspflicht verbundene Verhalten unterbleibt. Dem ist bei der Ausgestaltung der Regelungen Rechnung zu tragen. Eine Einstufung könnte bspw. über darauf spezialisierte Anbieter erfolgen. Dadurch würde der Aufwand für die einzelnen Akteure reduziert. Insbesondere bei kleinen und mittleren Unternehmen, die durch die Maßnahme verpflichtet würden, wären solche Abhilfen durch spezialisierte Akteure unerlässlich.

#### 5.4.5 Informationskampagne über den Energieaufwand neuer Technologien

Als weiteres informatorisches Instrument käme eine Informationskampagne über den Energieaufwand von neuen Technologien im Allgemeinen und Blockchain im Besonderen in Betracht. Eine solche Informationskampagne verspricht insbesondere **im Zusammenhang mit der Einführung eines Umweltlabels** eine Verstärkung dessen Anreizwirkung. Die Informationskampagne soll Transparenz über die Umweltauswirkungen von Blockchains schaffen und Informationsdefizite bei Privatanlegenden ausgleichen.

##### Ausgestaltung der Maßnahme

Im Rahmen der Informationskampagne könnten Privatpersonen und Unternehmen gezielt über die Umweltauswirkungen, die mit neuen Technologien verbunden sind, informiert werden. Eine solche Informationskampagne könnte bspw. die Bereitstellung von Informationsbroschüren oder Werbung auf Social Media beinhalten. Die Maßnahme sollte dabei auf eine sachliche Auseinandersetzung mit dem Problem des Energieaufwands neuer Technologien gerichtet sein und sich nicht allein gegen POW-Blockchains richten. Dadurch könnte die Glaubwürdigkeit der Kampagne erhöht werden. Neben der Blockchain-Technologie sind auch andere technologische Neuheiten wie Künstliche Intelligenz und Cloud-Computing mit einem erheblichen Energieaufwand verbunden. Für die damit verbundenen (indirekten) Umweltauswirkungen besteht regelmäßig nur ein geringes Bewusstsein. Eine solche Informationskampagne wäre mit einem vergleichsweise geringen Aufwand umsetzbar und wäre nicht direkt auf eine Mitwirkung der Akteure angewiesen. Sie wäre deutlich weniger eingriffsintensiv als andere bereits diskutierte Maßnahmen. Außerdem wäre der Wirkungsbereich der Informationskampagne nicht allein auf Deutschland bzw. die EU beschränkt. Durch entsprechende mehrsprachige Veröffentlichungen (insb. auch in englischer Sprache), wäre eine **internationale Reichweite** einer solchen Informationskampagne denkbar. Eine entsprechende Wirkung könnte durch rechtsförmige Maßnahmen nicht erreicht werden, da ihr Geltungsbereich immer räumlich auf das jeweilige Hoheitsgebiet beschränkt wäre.

Dennoch ist zu beachten, dass auch von staatlichem Informationshandeln eine beeinträchtigende (mittelbare) Wirkung ausgeht, indem Dritte ihr Verhalten entsprechend den staatlichen Informationen anpassen. Aufgrund dieser mittelbar-faktischen Wirkung der Maßnahme entsteht eine dem Staat zurechenbare **Grundrechtsbeeinträchtigung, die eine Rechtfertigung bedarf** (BVerfG Beschl. v. 26.06.2002 - 1 BvR 670/91, BVerfGE 105, 279 (300 f.)). Infolgedessen bedürfte auch eine solche Informationskampagne aufgrund des Vorbehalts des Gesetzes einer gesetzlichen Ermächtigung, sofern es sich um eine eingriffsähnliche Maßnahme handeln würde (BVerfG Beschl. v. 26.06.2002 - 1 BvR 670/91, BVerfGE 105, 279 (303)). Das sei

anzunehmen, wenn die staatliche Maßnahme „zielgerichtet zu Lasten bestimmter Betroffener einen im öffentlichen Interesse erwünschten Erfolg herbeiführen will“ (BVerwG NJW 2006, 1303 (1303)). Andernfalls könnte eine über die Aufgabenzuweisung hinausgehende Ermächtigungsgrundlage nicht gefordert werden, weil die genauen Ausgestaltungen und Auswirkungen der Informationstätigkeit nicht bereits vorab regelbar seien (BVerfG Beschl. v. 26.06.2002 - 1 BvR 670/91, BVerfGE 105, 279 (304 ff.)). Daher ist bei der Ausgestaltung der konkreten Informationskampagne darauf zu achten, inwiefern sie einen Grundrechtseingriff darstellt und ob sie einer gesetzlichen Ermächtigungsgrundlage bedarf.

### **Anreize und Umweltwirkungen**

Durch die Schaffung von Bewusstsein für die Umweltauswirkungen, die mit Blockchain verbunden sind, könnte ein Anreiz für Privatanlegerinnen und Blockchain-Nutzer entstehen auf umweltschonendere Anwendungen umzusteigen. Dabei ist zwischen Klein-/Privatanlegerinnen und professionellen Anlegerinnen oder Unternehmen als Adressaten der Informationskampagne zu unterscheiden. Bei Privatanlegenden ist eine größere Wirkung gegenüber professionellen Anlegern zu erwarten. Professionelle Anleger hingegen sind meist bereits ohne eine solche Informationskampagne umfassend informiert.

Hinsichtlich der Zielgruppe der Privatanleger hat die Studie von Drăgnoiu et al. (2023) gezeigt, dass Anlegende, die im Vorfeld der Anlageentscheidung über den Energieaufwand von Kryptowerten aufgeklärt wurden, sich eher für einen energieeffizienteren Kryptowert entscheiden als für energieintensivere Produkte (Drăgnoiu et al., 2023). Daraus kann abgeleitet werden, dass eine Verbesserung der Informationslage bezüglich der Umweltauswirkungen zu Verhaltensänderungen führen können mit denen positive Umweltwirkungen verbunden sind.

Es erscheint aber fraglich, ob ein entsprechendes Ergebnis auch mit einer abstrakten Informationskampagne erreicht werden kann. Abstrakte Informationskampagnen könnten zwar das Bewusstsein für die Umweltwirkungen verbessern, ihre Wirkung ist jedoch als alleinstehende Maßnahme nicht als besonders hoch einzuschätzen. Aufgrund der abstrakten Informationsebene werden die Privatanlegenden regelmäßig nicht in der Lage sein konkrete Handlungsentscheidungen treffen zu können. Eine entsprechende Informationskampagne dürfte daher erst in Verbindung mit einem Umweltlabel zu positiven Umweltwirkungen führen. Bei einem solchen Maßnahmenverbund könnte die abstrakte Informationskampagne zur Sensibilisierung der Bevölkerung beitragen, während das Umweltlabel die Anleger im Angesicht der konkreten Entscheidung auf die Umweltfolgen der Entscheidung hinweisen würde.

Da für Blockchain Developer die Wahrnehmung über „ihre“ Blockchain wichtig ist, könnten sie gleichzeitig incentiviert werden als Antwort auf die behördlichen Informationen oder direkt den Behörden genaue Informationen über den Energie- und Ressourcenverbrauch bereitzustellen. Somit würden sie die ggf. falsche Einschätzungen der Behörden mit genaueren Informationen korrigieren. Eine breit angelegte Informationskampagne könnte somit eine höhere Datentransparenz schaffen, worauf weitere, ggf. stringendere Maßnahmen aufgebaut werden könnten.

### **Bewertung der Maßnahme**

Die **Wirksamkeit** der Maßnahme hängt vom Umweltbewusstsein der Adressaten und von der geografischen Reichweite der Informationskampagne (national oder international) ab. Auch eine zielgruppenspezifische Ausgestaltung der Informationskampagne (andere Informationen für Firmen als für private Nutzerinnen) kann einen erheblichen Einfluss auf die Wirkung haben. Da die Zielerreichung mit großer Unsicherheit verbunden ist, sollte diese Maßnahme nur in Kombination mit anderen Maßnahmen angewendet werden. Insbesondere im Zusammenhang mit anderen Maßnahmen wie dem Umweltlabel für Blockchains könnte diese Wirksamkeit noch

verstärkt werden. In einem solchen Fall kann die Maßnahme zur Erreichung des Ziels des nachhaltigen Einsatzes von Blockchain beitragen. Durch die Sensibilisierung der Akteure für die Umweltfolgen im Zusammenhang mit Blockchain sind aber einige positive Einflüsse zu erwarten.

Eine Informationskampagne wäre auch **effizient**, da sie mit moderatem administrativem Aufwand verbunden ist und je nach Zielgruppe eine Verhaltensänderung hervorrufen kann. Die Kosten würden vor allem an einer zentralen Stelle, die die Informationskampagne leitet, einmalig anfallen. Darüber hinaus könnten die erstellten Materialien mehrfach verwendet und verbreitet werden. Die geringen Kosten stehen in einem ausgewogenen Verhältnis zum erwarteten Nutzen der Maßnahme.

In Anbetracht der möglichen Grundrechtsrelevanz einer solchen Informationskampagne bedarf deren **Umsetzbarkeit** einer eingehenden rechtlichen Prüfung, es sind aber wohl keine durchgreifenden Bedenken ersichtlich. In der Rechtfertigung dürften Klima- und Umweltschutzaspekte überwiegen. Im Übrigen dürfte sich die praktische **Umsetzbarkeit** jedoch als relativ einfach erweisen. Sie ist je nach Reichweite und Zielgruppe mit mehr oder weniger Aufwand verbunden.

#### 5.4.6 Selbstverpflichtungen von Unternehmen

Eine weitere Kategorie von Maßnahmen stellen Voluntary Agreements dar. Hierbei kann es sich sowohl um rein private Vereinbarungen wie auch um Vereinbarungen zwischen privaten und staatlichen Akteuren handeln.

##### Ausgestaltung der Maßnahme

Als kooperatives Instrument zwischen staatliche Stellen und privaten Akteuren kommen Selbstverpflichtungen von Unternehmen in Betracht, die sich freiwillig zur Verwendung bestimmter Effizienzstandards oder zur Nutzung von erneuerbaren Energiequellen verpflichten (sog. **Voluntary Agreement**, Abschnitt 5.3.3). Welche Selbstverpflichtungen im Einzelnen getroffen werden, ist den jeweiligen Akteuren überlassen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass von einigen Selbstverpflichtungen keine bis kaum positive Wirkungen zu erwarten sein können. positive Umweltwirkungen wären vor allen Dingen dann erwartbar, wenn sich die Akteure zur Nutzung erneuerbarer Energien als Energiequelle oder der Nutzung energieeffizienter Hardware bei sachgerechter Entsorgung und Recycling der bestehenden Hardware verpflichten würden.

Zur Umsetzung dieser Maßnahme würden staatliche Stellen mit Blockchain-Akteuren in Deutschland Abkommen schließen. Im Gegenzug könnten die staatlichen Stellen auf repressive Maßnahmen verzichten oder regulatorische Verbesserungen versprechen. Die Adressaten einer solchen Maßnahmen wären **Branchenverbände**, die stellvertretend für ihre Mitglieder selbstregulierende Maßnahmen treffen würden. Beispiele für solche Branchenverbände wären Zusammenschlüsse von Minern, von Kryptobörsen oder anderen Intermediären. Diese Akteure könnten sich dann gegenüber den staatlichen Stellen zur Einhaltung bestimmter Standards verpflichten.

Um Anreize für eine Einhaltung der Selbstverpflichtung zu schaffen, könnte eine solche Maßnahme mit einer gestuften Verschärfung der gesetzlichen Regulatorik für Blockchain kombiniert werden. Bei einer solchen gestuften Verschärfung des regulatorischen Rechtsrahmens wird ein klarer Zeitplan definiert und transparent offengelegt, wann neue hoheitliche Pflichten eintreten werden. Die regulatorischen Bedingungen verschärfen sich dadurch mit gewisser Zeit und die ursprünglich freiwillig vereinbarten Pflichten treten nun gesetzlich angeordnet ein. Dadurch entsteht für die Privaten ein gewisser zeitlicher Spielraum,

in dem sie sich an die veränderten regulatorischen Bedingungen anpassen können. Dies würde zu besserer Planbarkeit und Akzeptanz der Maßnahmen durch die Betroffenen führen.

### **Anreize und Umweltwirkungen**

Vertraglichen Selbstverpflichtungen wird in der Literatur eine größere **Akzeptanz** der Betroffenen gegenüber einseitig-hoheitlichen Maßnahmen zugesprochen. Ausgehend von dieser verbesserten Akzeptanz durch die privaten Akteure könnte sich ein Anreiz für die Entwicklung umweltbezogener Innovationen zur Umsetzung der Selbstverpflichtungen ergeben. Anstatt Maßnahmen zur Umgehung der hoheitlichen Pflichten zu suchen, wären die Akteure motiviert Lösungen für die Implementierung der selbstauferlegten Pflichten zu suchen. Indem die betroffenen Akteure selbst an der Festlegung dieser Maßnahmen beteiligt wurden, könnten sie erheblich dazu beitragen, dass diese Maßnahmen im Bereich des technisch machbaren lägen.

Durch die gestufte Verschärfung des regulatorischen Rahmens werden die ursprünglich freiwilligen Maßnahmen durch Sanktionen abgesichert. Dadurch könne Zuwiderhandlungen verhindert werden.

### **Bewertung der Maßnahme**

Positiv für die **Wirksamkeit** von Selbstverpflichtungen der Akteure hervorzuheben ist deren grundsätzlich große Akzeptanz unter den Betroffenen, weil sie selbst an der Entwicklung geeigneter Maßnahmen mitwirken können. Die Parteien können sich auf Standards einigen, die technisch umsetzbar wären. Je nach Ausgestaltung dieser Standards ließen sich dadurch negative Umweltwirkungen verhindern. Die Betroffenen hätten ein Interesse an der Suche nach innovativen Lösungen. Wenn die Selbstverpflichtung mit einer Bestrafung bei Nichteinhaltung verbunden wäre, könnte sie sehr wirksam und effizient sein, da sie - soweit möglich - die Interessen aller beteiligten Parteien berücksichtigt und in das Kalkül miteinbezieht.

Allerdings wäre die Maßnahme naturgemäß nur auf nationale Akteure beschränkt. Die Wirkungen von Selbstverpflichtungsmaßnahmen werden erst nach gewisser Zeit eintreten, da den Akteuren regelmäßig ein Implementierungszeitraum zugestanden werden muss. Entsprechende Maßnahmen können außerdem von einem **geringen Ambitionsniveau** geprägt sein, wenn sich die Akteure nur zu Maßnahmen verpflichten, die sie bereits technisch umsetzen können. Welches Ambitionsniveau letztlich erreicht wird hängt davon ab, ob eine hinreichende Verhandlungsbereitschaft der Akteure besteht und ob sie bereit sind sich zu Maßnahmen freiwillig zu verpflichten. Die jeweilige Umweltwirkung, die von der Maßnahme ausgeht, hängt von der jeweiligen Ausgestaltung der Selbstverpflichtung im Einzelfall ab. Wenn die Akteure sich bspw. für die ausschließliche Nutzung erneuerbarer Energiequellen verpflichten würden, so können die Treibhausgasemissionen auf nahe Null gesenkt werden. Die Maßnahme hätte dann erhebliche positive Umweltauswirkungen. Das gleiche gilt für entsprechende Verpflichtungen bei anderen Nachhaltigkeitsaspekten, wie bspw. eine Selbstverpflichtung zur ordnungsgemäßen Entsorgung und Recycling der Hardware oder einer Verpflichtung zur Offenlegung der eigenen Umweltauswirkungen.

Gegen die Wirksamkeit einer solchen Maßnahme spricht aber, dass die Akteure, die nicht zur Einhaltung der Standards bereit wären, aufgrund der auf Deutschland beschränkten Reichweite der Maßnahme ausweichen könnten. Darüber hinaus wären die Privaten nur dann freiwillig zu einschneidenden Selbstverpflichtungen bereit, wenn öffentlichen oder staatlichen Druck besteht. Können die staatlichen Stellen bei den Privaten keine Verhandlungsbereitschaft herstellen und die Privaten daher nicht zu ambitionierten Selbstverpflichtungen motivierten, sind von einer solchen Maßnahme nur geringe Einflüsse auf die nachhaltige Nutzung von Blockchain zu erwarten. Die Wirksamkeit im Einzelnen hängt aber von der konkreten Ausgestaltung der Selbstverpflichtung ab. Solange jedoch nur ein geringes Ambitionsniveau bei

der Selbstverpflichtung der Akteure zu erwarten wäre, ist nur von einem geringen Einfluss der Maßnahme auf die nachhaltige Nutzung von Blockchain auszugehen.

Die Wirksamkeit der Selbstverpflichtung wäre daher dann höher, wenn die Privaten sich aufgrund der drohenden nationalen Maßnahmen zu ambitionierteren Maßnahmen verpflichten würden. Betrachtet man daher allein die europäische Wirksamkeit der Maßnahme, so ist hier aufgrund des unmittelbaren Zugriffs des Gesetzgebers von einem höheren Ambitionsniveau auszugehen. Global ist die Wirksamkeit der Maßnahme jedoch gering.

Zwar ist die Maßnahme nur mit einem sehr geringen Nutzen verbunden. Da diese Wirkungen aber auch zu nur geringen Kosten erzeugt werden können, ist die Maßnahme **effizient**. Die Betroffenen haben meist gegenüber dem Regulierer einen Informationsvorsprung und können sich daher zu Maßnahmen verpflichten, die zu geringen Kosten umsetzbar sind.

Die Kosten der Umsetzung tragen lediglich die Verursacher der Externalität. Es ist zweifelhaft, warum die Betroffenen zu Verhandlungen über Branchenstandards bereit sein sollten. Um die **Verhandlungsbereitschaft** der Privaten zu erhöhen, müssten die öffentlichen Stellen daher gleichzeitig Vorschläge für eine regulatorische Entlastung an anderer Stelle einbringen, die die Privaten im Gegenzug für eine Selbstverpflichtung erhalten könnten. Durch entsprechende in Aussicht gestellte Vorzüge könnte die Verhandlungsbereitschaft der Betroffenen erhöht werden.

Eine wesentliche Bedingung für die **Umsetzbarkeit** einer solchen Maßnahme ist die Organisation der Akteure im Blockchain-Umfeld in Branchenverbänden. Durch die Verhandlungen mit entsprechenden Branchenverbänden können die **aufwändigen Verhandlungsprozessen** auf einige wenige Verhandlungen reduziert werden. Die Maßnahme hängt daher wesentlich von einer entsprechenden Organisation der Branche ab. Darüber hinaus spielt für die Umsetzbarkeit der Maßnahme die Verhandlungsbereitschaft der Verursacher eine wesentliche Rolle. Aus politischer Sicht ist nur ein geringer Widerstand zu erwarten, da die Parteien sich selbst zu bestimmten Maßnahmen verpflichten würde. Die Maßnahme wäre daher von hoher Akzeptanz geprägt. Es sind daher keine nennenswerten Hindernisse, die gegen die Umsetzbarkeit der Maßnahme sprechen würden, ersichtlich.

#### 5.4.7 Importzölle, Abgaben und Subventionen bei der Erneuerung der Hardware

Die Erneuerung der Hardware und die damit verbundene Verbesserung der Energieeffizienz des Betriebs des Konsensmechanismus liegt im ureigenen Interesse der Miner. Die Wirtschaftlichkeit des Betriebs des Konsensmechanismus ist gerade bei POW-Blockchain in erheblichem Maße vom Energieaufwand der Hardware abhängig. Daher besteht ein **grundsätzlicher Anreiz** für eine ständige Erneuerung der Hardware, die beim Betrieb des Konsensmechanismus verwendet wird. Dieser Anreiz könnte durch **marktbasierte Instrumente** noch weiter verstärkt werden.

##### Ausgestaltung der Maßnahme

Der Betrieb des energieintensiven POW-Konsensmechanismus bedarf **spezialisierter Hardware** (sog. ASIC-Rechner), während andere Konsensmechanismen ohne diese spezialisierte Hardware auskommen. Da gerade mit POW-Blockchain ein großer Teil des Energieaufwands von Blockchains verbunden ist, erscheinen spezifische Maßnahmen gerechtfertigt. Um marktbasierte Anreize für eine Erneuerung der Hardware zu setzen, kommen verschiedene Instrumente in Betracht. Ein Beispiel für ein solches Instrument wäre eine **Abgabe** oder ein **Zoll** auf das Inverkehrbringen bzw. den Import von Blockchain-spezifischer Hardware (z.B. ASIC-Rechner), deren Höhe von der Energieeffizienz der Geräte abhängig ist. Eine solche Abgabe könnte bei der administrativen Durchsetzung auf **bestehende Strukturen** aufsetzen und Zoll- bzw. Steuerbehörden für die Durchsetzung nutzen. Die bürokratische Belastung für die

Endkunden wäre gering, da mit einer solchen Maßnahme in erster Linie die Verkäufer bzw. Importeurinnen der Geräte als professionelle Akteure zur Zahlung und Abwicklung der Abgabe verpflichtet würden. Dies erleichtert die Durchsetzung der Maßnahme.

Anstelle eines belastenden Anreizes kämen aber auch entlastende Maßnahmen für die Akteure in Betracht. Die Umstellung der Mining-Infrastruktur auf energieeffiziente Hardware ist mit nicht unerheblichen Investitionen verbunden. Um entsprechende Investitionen in energieeffiziente Hardware zu ermöglichen, kann es notwendig sein, die Betreiber von Miner mit **Anstoßsubventionen** zu unterstützen. Als Subventionen sind bspw. Zuschüsse oder zinsvergünstigte Darlehen denkbar. Bedingung für eine entsprechende Subvention wäre der Nachweis einer Investition in die Erneuerung bestehender Mining-Infrastruktur durch den Austausch veralteter, energieintensiver Hardware. Durch eine entsprechende Verbesserung der Finanzierungsbedingungen von umstellungswilligen Miner könnten die Hürden für Investitionen in moderne Hardware gesenkt werden. Darüber hinaus würden weitere private Finanzmittel für eine Umstellung der Hardware aktiviert.

Als Alternative zu Anstoßsubventionen kämen **Sonderabschreibungen** für den Erwerb von energieeffizienter Hardware in Betracht. Die Höhe bzw. die Gewährung einer solchen Sonderabschreibung könnte von der Energieeffizienz des Produkts abhängig sein.

Bei der Gewährung von Anstoßsubventionen und Sonderabschreibungen ist zu beachten, dass solche Maßnahmen auch zur Ausweitung der Mining-Aktivitäten durch einen Aufbau zusätzlicher Rechenkapazitäten führen könnte. Dadurch würde das Ziel eines nachhaltigen Einsatzes von Blockchains konterkariert. Um einen solchen Ausbau der Rechenkapazitäten zu verhindern, sollte die Gewährung von Anstoßsubventionen oder Sonderabschreibungen an die Bedingung gekoppelt werden, dass ältere Geräte ausgetauscht werden und nicht in neue Rechenkapazitäten investiert wird.

### **Anreize und Umweltwirkungen**

Eine Abgabe oder einen Zoll auf Blockchain-spezifische Hardware hätte Auswirkungen auf den Preis dieser Geräte. Es ist zu erwarten, dass die Importeure bzw. Verkäuferinnen die Preissteigerungen an die Endkunden und Endkundinnen weitergeben würden. Dadurch steigt der Preis dieser Geräte, wodurch sich Investitionen in den Aufbau neuer Rechenkapazitäten verteuern würden. Eine Umstellung der *bestehenden* Hardware wird dadurch tendenziell verzögert. Aus der Einführung eines Zolls oder einer Abgabe auf den Import bzw. den Kauf von ASICs ergeben sich noch keine Auswirkungen auf *bestehende* Geräte, die bereits erworben wurden. Erst beim Erwerb neuer Hardware entstehen neue (im Vergleich zum Status Quo) höhere Kosten. Daraus entsteht ein Anreiz die bestehende Hardware möglichst lange weiter zu nutzen, um neue (teurere) Investitionen zu vermeiden.

Ist der Miner dennoch dazu gezwungen neue Hardware zu erwerben, spielt die Energieeffizienz der Geräte aufgrund des hohen Stromverbrauchs eine große Rolle. Wenn die Höhe der Abgabe an die Energieeffizienz des Produktes gekoppelt ist, würden Geräte mit einer schlechteren Energieeffizienz im Vergleich zu anderen Geräten teurer. Dadurch würden energiesparendere Geräte gegenüber energieintensiven Geräten preislich attraktiver.

Jedoch hat, sogar wenn nun vermehrt, energieeffiziente Mining-Geräte zum Einsatz kommen würde, dies zumindest bei Bitcoin kaum einen Einfluss. Das hängt mit der Ausgestaltung der POW-Blockchain zusammen: Mit zunehmender Rechenleistung des Gesamtsystems steigt auch die Komplexität der zu lösende Aufgabe (vgl. für Bitcoin: Nakamoto, 2009). Die Miner wären dann zwar effizienter, aber die Aufgabe würde in einem solchen Fall einfach komplexer werden. Das bedeutet, dass pro Gerät mehr Berechnungen durchgeführt werden müssten, um die Chance

auf eine Belohnung stabil zu halten. Eine Staffelung der Zölle nach Energieeffizienz ist daher nicht sinnvoll und langfristig unter Umständen gar schädlich.

Wenn keine Staffelung nach Energieeffizienz vorgesehen ist, ergeben sich ähnliche Wirkungen wie bei einem Verbot von POW-Mining. Mining würde innerhalb der EU unattraktiver und es käme vermutlich zumindest teilweise zu einer, in Abhängigkeit der Höhe der Zölle, Verlagerung der Mining Aktivitäten in andere Weltregionen.

Es muss betont werden, dass bereits **ohne eine zusätzliche Abgabe** auf Blockchain-spezifische Hardware ein **Anreiz für die Miner besteht energiesparende Geräte einzusetzen**. Der Energieaufwand stellt einen wesentlichen Kostenfaktor beim Betrieb von Mining-Farmen dar. Um die eigenen Kosten gering zu halten, wird ein rationaler Miner bereits von vorneherein in energiesparende Geräte investieren und die Kosten im Zusammenhang mit Energieaufwänden bestmöglich reduzieren.

Aus dem gleichen Grund wie die Steuer würde auch eine Subvention wirkungslos sein. Durch eine **Subvention** oder durch **Sonderabschreibungen** bei Investitionen in die Erneuerung bestehender Hardware würde die finanzielle Belastung der Miner verringert. Sie hätten also einen Anreiz, ihre Hardware zu ersetzen. Aufgrund der steigenden Komplexität des Rätsels würde dieser Effekt jedoch durch den erhöhten Rechenaufwand wieder aufgehoben.

Zu beachten ist bei diesen Maßnahmen zudem, dass für die Herstellung der neuen Hardware weitere Ressourcen aufgewendet werden müssen. Dies kann zu zusätzlichen Umweltbelastungen führen.

#### **Bewertung der Maßnahme**

Die **Wirksamkeit** der hier vorgeschlagenen Maßnahmen ist nicht gegeben. Für die Miner besteht bereits ein Anreiz zur Nutzung energieeffizienter Hardware. Dieser Anreiz kann durch die vorgeschlagenen Instrumente je nach Ausgestaltung und Höhe nicht signifikant verstärkt werden. Innerhalb der Maßnahmen zeigt sich eine Abstufung, wonach die Importzölle und Abgaben auf den Erwerb von ASICs wirksamer sein können als die Subventionen, da sie sich unmittelbar auf den Preis auswirken. Dies setzt jedoch voraus, dass dieser Effekt nicht durch eine Verringerung des Preises aufgrund der verringerten Nachfrage nach energieintensiven Geräten wieder ausgeglichen wird. Sogar wenn die Maßnahme zu effizienteren Geräten führen würde, so wäre die Maßnahme praktisch wirkungslos, da sie im Gleichgewicht nur zu höheren Energieaufwände pro Gerät führen würde. Weiterhin betrifft diese Maßnahme nur Miner in der EU, welche nur einen geringen Teil des Gesamtmarktes ausmachen. Im Ergebnis hat die Maßnahme daher nur einen sehr geringen Einfluss auf die nachhaltige Nutzung von Blockchain.

Subventionen sind aus ökonomischer Sicht **ineffizient**, da sie Mitnahmeeffekte generieren, die Investitionen in nicht-subventionierte, womöglich effizientere Technologien reduzieren und die wahre Knappheit eines Energieträgers vor den Konsumenten verschleiern. Die vorgeschlagenen Maßnahmen wären vorliegend nur von geringer Wirksamkeit. Es ist nicht hinreichend sichergestellt, dass sie die erhofften Wirkungen erzielen kann. Die Maßnahme würde daher bei geringem Nutzen sehr hohe Kosten verursachen.

Die Maßnahmen wären aber wohl gut **umsetzbar**. Der administrative Aufwand ist begrenzt, da die Maßnahmen im Wesentlichen auf bestehende Strukturen (z.B. Zollbehörden) zurückgreifen würden. Im Gegensatz zu einer zusätzlichen Abgabe bzw. einem Importzoll würden Subventionen und Sonderabschreibungen die **öffentlichen Haushalte** belasten. Bei Subventionen würden Zahlungen an die privaten Akteure fällig, während sich bei Sonderabschreibungen das Steueraufkommen reduzieren würde. Im Kontext von angespannten

Haushaltslagen und Diskussionen über Subventionsabbau ist die politische Umsetzbarkeit solcher, den Haushalt belastender Maßnahmen daher wohl eher fernliegend.

Bei der Einführung einer solchen Abgabe müssten außerdem die rechtlichen Vorgaben durch die WTO, Handelsabkommen bzw. das EU-Recht eingehalten werden. Insbesondere für Subventionen und Sonderabschreibungen sind die unionsrechtlichen Vorgaben für die Einführung von Beihilfen gem. Art. 107 ff. AEUV zu beachten.

Es ist zu beachten, dass nur mit der Einführung von zusätzlichen Zöllen und Abgaben Wirkungen für die bereits eingesetzte Hardware verbunden wären. Dadurch könnte die Nutzungsdauer der Hardware verlängert werden, wenn die Akteure aufgrund der gestiegenen Kosten für die Hardware von einer Erneuerung absehen. Eine solche Maßnahme wäre daher im Hinblick auf die Verringerung des Ressourcenaufwands bei der Produktion von Hardware und die Vermeidung von Abfällen positiv zu bewerten, da sie zu einer Verlängerung der Nutzungsdauer der Geräte führen könnte. Gleichzeitig ist aber auch zu beachten, dass dadurch weniger energieeffiziente Geräte länger im Betrieb gehalten würden. Dies hätte jedoch weltweit aufgrund des oben beschriebenen Mechanismus kaum einen Einfluss auf die Emissionen. Steigt die Rechenleistung im Gesamtsystem nicht an, dann steigt auch die Komplexität der zu lösende Aufgabe nicht an.

#### 5.4.8 Transaktionssteuer für Kryptowerte

Sogenannte Kryptowährungen (Payment Token) kommen in der öffentlichen Debatte über Blockchain besondere Aufmerksamkeit zu.<sup>96</sup> Sie stellen einen nicht unwesentlichen Anteil der tatsächlichen und potenziellen Anwendungen von Blockchains dar. Neben Payments Token sind darüber hinaus auch Utility und Security-Token als Investment-Vehikel zu nennen. Mit diesen Kryptowerten sind aber gleichzeitig auch erhebliche Umweltauswirkungen verbunden. Daher bedürfen sie besonderer regulatorischer Aufmerksamkeit.

##### Ausgestaltung der Maßnahme

Eine Maßnahme zur Regulierung von Kryptowerten wäre eine Steuer auf Transaktionen mit Kryptowerten (sog. **Transaktionssteuer**). Als Verkehrssteuer wird mit einer Transaktionssteuer der Vorgang der Transaktion und nicht der daraus entstehende Gewinn besteuert. Der Veräußerungsgewinn unterliegt weiterhin zusätzlich der entsprechenden **Ertragssteuer**.

Eine Transaktion mit Kryptowerten würde dann steuerpflichtig, wenn sie unter Beteiligung mindestens eines Inländers erfolgt. Für eine solche Transaktion müsste je nach Ausgestaltung entweder der Verkäufer oder der Käufer von Kryptowerten eine Steuer entrichten. Daneben wäre eine solche Steuer auch bei neuemittierten Kryptowerten bei einem Initial Coin Offering (sog. ICO) fällig.

Die Reichweite der Transaktionssteuer kann dabei je nach Ausgestaltung variieren. Aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten wäre es sinnvoll nur Kryptowerte, die auf einer POW-Blockchain basieren, zum Gegenstand einer solchen Transaktionssteuer zu machen.

Besondere Beachtung ist der **administrativen Durchsetzung** einer Transaktionssteuer für Kryptowerte zu schenken. Zur Durchsetzung von Transaktionssteuern auf Finanzinstrumente wurden in der Vergangenheit zum Teil zentrale Abwicklungssysteme eingeführt (z.B. in Großbritannien, vgl. Funke et al., 2020, S. 39). Eine solche zentrale Abwicklungsstelle scheidet

---

<sup>96</sup> Bitcoin ist ein Kryptowert und wird von der Europäischen Zentralbank nicht als Währung eingestuft (vgl. Europäische Zentralbank, 2021).

bei Blockchain-Anwendungen aber aus, da es bei Blockchains aufgrund deren dezentralen Verteilung keine zentrale Stelle notwendig ist, die die Transaktionen abwickelt.

Alternativ könnten die Finanztransaktionen aber auch durch eine entsprechende **Steuererklärung** der steuerpflichtigen Personen erfasst werden (Funke et al., 2020, S. 39 f.). Im Hinblick auf die Ertragssteuer sind die steuerpflichtigen Personen ohnehin verpflichtet ihre Verkäufe anzugeben, damit die Ertragssteuer für etwaige Veräußerungsgewinne geltend gemacht werden kann. Um den administrativen Aufwand möglichst zu verringern, wären Jahresfreibeträge für kleinere Transaktionen denkbar. Problematisch ist, dass durch eine solche Durchsetzung der Transaktionssteuer die Transaktionen womöglich nur **lückenhaft erfasst** werden und eine solche Meldepflicht mit einem **administrativen Aufwand** für die Steuerverwaltung einherginge. Unter Umständen wäre es möglich hier auf die Unterstützung von sog. Krypto-Intermediären zurückzugreifen, wie bspw. Kryptobörsen oder Kryptowechselstellen. Sie könnten eine entsprechende Steuer standardisiert für die Steuerpflichtigen abführen oder entsprechende Transaktionen melden. Eine Selbstmeldung der Steuerpflichtigen wäre dann auf den Handel ohne Hinzuziehung der Krypto-Intermediäre beschränkt.

### **Anreize und Umweltauswirkungen**

Die Folgen einer Transaktionssteuer wurde für den Handel mit Aktien bereits eingehend untersucht (Funke et al., 2020, S. 20 ff. m. w. N.). Danach könnte eine Transaktionssteuer zur Eindämmung des kurzfristigen Handels und der Förderung eines **langfristigen Anlagehorizontes** beitragen. In den entsprechenden Untersuchungen konnten sinkende Handelsvolumina (Funke et al., 2020, S. 20 f. m. w. N.) und leichte Tendenzen zu einem Rückgang der Liquidität (Funke et al., 2020, S. 22 f. m. w. N.) nachgewiesen werden. Auswirkungen auf das Preisniveau seien nicht nachweisbar (Funke et al., 2020, S. 25), während die Auswirkungen auf die Volatilität nicht eindeutig waren (Funke et al., 2020, S. 21 f.).

Die Intensität der Wirkung einer Transaktionssteuer ist von der Höhe der Steuer abhängig. Je höher die Steuer ist, desto größer sind die Anreize der Betroffenen ihr Verhalten zu ändern.

Für die hier zentrale Zielsetzung der Incentivierung eines nachhaltigeren Einsatzes von Blockchain stellt sich die Frage, ob sich daraus positive Umweltwirkungen ergeben. Direkte Auswirkungen sind nach den genannten Folgen einer Transaktionssteuer auf die Handelsaktivitäten nicht nachweisbar. Lediglich ein Anreiz für eine **verlängerte Haltedauer** ließ sich identifizieren.

Fraglich ist, welche Umweltwirkungen sich aus einer Verlängerung der Haltedauer ergeben. Als **unmittelbare** Folge einer längeren Haltedauer lässt sich eine **Abnahme der Anzahl von Transaktionen** ableiten. Aus einer **Abnahme der Transaktionen** würde ceteris paribus die **Abnahme von Mining-Aktivitäten folgen**. Die Vergütung der Miner ergibt sich neben der Belohnung für die Blockerstellung auch aus den Transaktionsgebühren für die Verarbeitung von Transaktionen. Die Höhe der Transaktionsgebühr hängt dabei von der Anzahl der zu validierenden Transaktionen im Netzwerk ab. Steigt die Anzahl an Transaktionen, so konkurrieren mehr Transaktionen um einen Platz in dem neu anzufügenden Block. Die Benutzenden sind bereit höhere Gebühren zu bezahlen, um sicherzustellen, dass ihre Transaktionen priorisiert und schneller verarbeitet werden. Die Transaktionsbeteiligten müssten mehr für eine Transaktion ausgeben, d.h. eine höhere Transaktionsgebühr in Aussicht stellen. Nimmt die Anzahl der Transaktionen ab, sinkt auch die Höhe der Transaktionsgebühr. Der Wettbewerb um den Blockraum nimmt ab. Die **Höhe der Transaktionsgebühr** ist folglich von der Anzahl der Transaktionen im Netzwerk abhängig. Folglich hängen auch die Einnahmen der Miner mit Höhe der Transaktionsgebühr zusammen. Mit der Abnahme der Transaktionen

sinkt ceteris paribus die Belohnung, die ein Miner für die Verarbeitung von Transaktionen erhält. Damit **sinkt** auch die **Attraktivität des Mining**. Je höher die Steuer, desto stärker ist dieser Effekt.

Diese Effekte können aber womöglich wieder durch **Auswirkungen der geringeren Verfügbarkeit** der Payment Token auf dem Markt **abgeschwächt** werden. Die längere Haltedauer verknappt das Angebot, was einen gegenläufigen Effekt auf den Preis hat. Insgesamt ist aber davon auszugehen, dass die Nachfrage aufgrund dieser Maßnahme sinken wird.

Als weiterer Aspekt könnte sich aus einer Transaktionssteuer ein **komparativer Nachteil** von Kryptowerten gegenüber anderen Anlageprodukten, bei denen keine Transaktionssteuer fällig wird, ergeben. Eine Transaktionssteuer für Kryptowerte würde zu **steigenden Kosten** für eine Anlage in Kryptowerte im Vergleich zu anderen Anlageprodukten führen. In Deutschland wird für andere Anlageklassen wie Aktien oder Anleihen keine Transaktionssteuer fällig. Außerdem würde aus der Verpflichtung Transaktionen mit Kryptowerten in der Steuererklärung anzugeben, ein **hoher bürokratischer Aufwand** für die Bürgerinnen und Bürger folgen.

Ein solcher Nachteil hätte indirekte Auswirkungen auf die Handelsaktivitäten im Zusammenhang mit Kryptowerten. Aus dem komparativen Nachteil der Kryptowerte gegenüber anderen Anlageklassen könnte eine verringerte Nachfrage nach Kryptowerten folgen und damit eine Verringerung des Investitionsvolumens in Kryptowerte einhergehen. Bei gleichbleibendem Angebot könnte dies zu einem **Preisrückgang** führen. Insbesondere bei POW-basierten Kryptowerten sind die Miner aber aufgrund der dabei anfallenden Kosten für ihren Energieaufwand auf ein gewisses Preisniveau angewiesen.

Die genauen Umweltwirkungen, die aus einer Transaktionssteuer folgen, hängen von der Höhe der Steuer ab. Unterstellt man die Abnahme des Investitionsvolumens in Kryptowerte aufgrund eines komparativen Nachteils gegenüber anderen Anlageklassen, so kann daraus eine Abnahme der Mining-Aktivität folgen. Die Abnahme des Anlagevolumens wäre folglich mit **positiven Umweltauswirkungen** verbunden.

Dafür ist aber entscheidend, dass die **Anlageformen** verglichen werden können. Die Motivationslage für die Entscheidung für eine Anlageklasse erscheint deutlich komplexer als hier beschrieben. Auch eine rationale Anlegerin wird nicht allein steuerliche Gründe für den Erwerb von Kryptowerte heranziehen. In der Regel dürfte bei Anlegern hingegen vor allen Dingen die (spekulativen) Gewinnerwartungen im Vordergrund stehen. Hier würde eine steuerliche Belastung, die die Nettogewinne der Anlegerinnen schmälert, durchaus in die Bewertung der Anlageentscheidung einfließen. Allerdings ist zu beachten, dass die Erwartungen der Anleger in Kryptowerte im Hinblick auf etwaige Spekulationsgewinne meist sehr groß sind. Je höher die steuerliche Belastung durch die Transaktionssteuer ausfällt, desto schwerer würde eine solche Steuer bei der Bewertung der Anlagemöglichkeiten ins Gewicht fallen.

Darüber hinaus ist für die erwarteten positiven Umweltwirkungen entscheidend, wie die erwarteten Steuereinnahmen verwendet werden. Wird die Steuer **zweckgebunden** vom Staat zur Reduktion der Umweltwirkungen des europäischen Mining eingesetzt, so sind die **positiven Umweltwirkungen höher** einzuschätzen als bei einer zweckungebundenen Steuer. Die Steuereinnahmen könnten bspw. zum Ausgleich der mit dem Mining verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen verwendet werden (z.B. CO<sub>2</sub>-Entnahme, Kauf von Emissionszertifikaten).

Für die weitere Betrachtung soll eine Transaktionssteuer unterstellt werden, die ihrer Höhe nach so empfindlich ist, dass sie die Betroffenen zu einer Verhaltensänderung incentiviert, und die Steuereinnahmen zweckgebunden zur Kompensation der Umweltwirkungen des europäischen Mining eingesetzt werden.

## Bewertung der Maßnahme

Je höher die Steuer ausfällt, desto stärker ist der Anreiz auf Kryptowerte zugunsten anderer Anlageformen zu verzichten. Daraus ergäben sich dann positive Umweltwirkungen, die insbesondere durch die zweckgebundene Verwendung der Steuermittel zur Abmilderung der Umweltwirkungen des Mining verstärkt werden könnten. Die damit verbundenen positiven Effekte würden dann einen erheblichen Beitrag zur Erreichung der europäischen Regulierungsziele leisten. Daher wäre die **Wirksamkeit** einer zweckgebundenen Steuer auf **europäischer Ebene** hoch einzuschätzen.

Für eine Transaktionssteuer für Kryptowerte spricht außerdem, dass sie zu mehr Transparenz für die Behörden führen würde, wer in Kryptowerte investiert und welche Transaktionen durchgeführt werden. Durch die Meldung der Transaktionen mit Inländerbeteiligung in den Steuererklärungen, erhalten die Steuerbehörden einen Einblick in das Transaktionsgeschehen auf dem Kryptomarkt. Diese Transparenz geht über die bisherige Steuererklärung hinaus, da nicht nur Veräußerungsvorgänge, sondern auch Erwerbsvorgänge erfasst werden müssten. Die gewonnenen Erkenntnisse könnten aber zu einem späteren Zeitpunkt als Grundlage für gezieltere Regulierungsentscheidungen genutzt werden.

Im Hinblick auf die **Effizienz** der Maßnahme ist zu beachten, dass sie sowohl für private als auch staatliche Stellen mit **Kosten** verbunden wäre. Die Steuerpflichtigen müssen in der Steuererklärung jede einzelne Transaktion aufführen, die wiederum von den Steuerbehörden nachzuvollziehen und ggf. zu überprüfen sind. Die Gesamtkosten der Steuer für Private ist abhängig von der Höhe der Transaktionssteuer, dem bürokratischen Aufwand sowie dem Anlageverhalten des Betroffenen. Mit steigenden Steuersätzen steigt tendenziell die Lenkungswirkung des Instruments, jedoch auch die Kosten. Eine abschließende Einschätzung der Effizienz der Steuer ist daher nicht möglich.

Der mit einer Transaktionssteuer verbundene zusätzliche **bürokratische Aufwand** für die Anlegenden und die staatlichen Steuerbehörden kann gegen die **Umsetzbarkeit** der Maßnahme sprechen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass es sich voraussichtlich nur um einen geringen Mehraufwand gegenüber dem Status quo handeln wird. Bereits zum jetzigen Zeitpunkt sind Veräußerungen von Kryptowerten in der Steuererklärung zur Festlegung der Ertragssteuer anzugeben. Im Hinblick auf die rechtliche Umsetzbarkeit sind **gleichheitsrechtliche Erwägungen** zu berücksichtigen, wenn eine Transaktionssteuer sich lediglich auf (POW-basierte) Kryptowerte erstrecken würde. Es müsste ein Abgrenzungskriterium gefunden werden, das eine Ungleichbehandlung von PoW-basierten Kryptowerten gegenüber anderen Wirtschaftsgütern rechtfertigen kann (z.B. die Umweltbilanz).

### 5.4.9 Verlängerung der Spekulationsfrist auf zehn Jahre

Gewinne aus Veräußerungsgeschäften von im Privatvermögen gehaltenen Kryptowerten sind nach einem Jahr steuerfrei (sog. Spekulationsfrist). Diese Spekulationsfrist könnte auf zehn Jahre verlängert werden. Alternativ wäre auch die vollkommene Abschaffung der steuerfreien Veräußerungsgewinne nach Ablauf einer bestimmten Frist denkbar. Payment und Utility Token stellen einen in der Praxis besonders relevanten Anwendungsfall von Blockchains dar, weshalb eine gezielte Regulierungsmaßnahme gerechtfertigt ist.

Die Analyse der bestehenden einjährigen Spekulationsfrist hat ergeben, dass daraus eher Anreize für ein Verhalten der Anlegerinnen mit negative Umweltwirkungen folgen. Daher sollte die Spekulationsfrist verändert werden. Hier kommen zwei Möglichkeiten in Betracht: Zum

einen eine Verlängerung der Spekulationsfrist auf zehn Jahre, zum anderen eine ersatzlose Abschaffung der Spekulationsfrist für Kryptowerte.

### Ausgestaltung der Maßnahme

Als weitere Regulierungsmaßnahme auf dem Gebiet des Steuerrechts käme eine Verlängerung der Spekulationsfrist für Payment und Utility Token **auf zehn Jahre** in Betracht. Gem. §§ 22 Nr. 2, 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 EStG sind Gewinne aus der Veräußerung von im Privatvermögen gehaltenen Token steuerfrei, wenn der Zeitraum zwischen der Anschaffung und der Veräußerung **nicht mehr als ein Jahr** beträgt. Durch eine Änderung des EStG könnte die Spekulationsfrist auf zehn Jahre erhöht werden. Eine Frist von zehn Jahren findet derzeit auch in den Fällen des § 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 S. 4 EStG Anwendung.

Der Zeitraum von zehn Jahren wurde gewählt, um eine einheitliche Frist mit § 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 S. 4 EStG herzustellen. Darin ist eine zehnjährige Spekulationsfrist unter bestimmten Bedingungen vorgesehen. Alternativ könnten aber auch kürzere Fristen gewählt werden.

### Anreiz und Umweltwirkungen

Die **unmittelbare** Anreizwirkung einer Spekulationsfrist von zehn Jahren wäre auf eine Verlängerung der Haltedauer bei Payment und Utility Token gerichtet. Daraus würde eine **Abnahme der Anzahl von Transaktionen** folgen. Steuern spielen für das Anlageverhalten eines rational handelnden Anlegers oder einer rational handelnden Anlegerin eine unmittelbare Rolle, da sie Einfluss auf seine/ihre Nettoendite haben (Bessler/Kurth, 2006, S. 1). Kann der Investor/die Investorin die Payment Token nach zehn Jahre steuerfrei verkaufen, so könnte er/sie geneigt sein, das Verstreichen der Spekulationsfrist abzuwarten, um die Veräußerungsgewinne steuerfrei zu erhalten und daher seine/ihre Nettoendite zu steigern. Aus der Möglichkeit des steuerfreien Verkaufs nach zehn Jahren folgt eine Belohnung und damit ein Anreiz für den Anlegenden, wenn er die Tokens mindestens zehn Jahre hält. Die Wirkung dieses Anreizes steigt mit der Höhe des individuell anzusetzenden Steuersatzes.

Aus einer solchen **Abnahme der Transaktionen** könnten sich die oben beschriebenen Folgen ergeben (vgl. Abschnitt 5.4.8). Durch eine geringere Verfügbarkeit der Payment und Utility Token auf dem Markt könnten entsprechende Effekte aber wieder ausgeglichen werden. Werden die Payment und Utility Token länger gehalten, so wird das Angebot der Token auf dem Markt verknappt. Daraus können sich **zwei Wirkungen auf den Preis** ergeben. Aufgrund einer **Knappheit** könnte bei gleichbleibender Nachfrage der *Preis steigen*. Durch einen steigenden Preis würden die geringeren Transaktionsgebühren wieder ausgeglichen. Auf der anderen Seite kann die längere Haltedauer auch Auswirkungen auf die **Liquidität** des Marktes haben, was *negative Folgen für die Preisentwicklung* hätte, da Investoren in illiquiden Märkten eher von einer Investition absehen würden. Die Auswirkungen, die sich aus einer verlängerten Haltedauer ergeben, sind somit nicht eindeutig und können daher **nicht abschließend bewertet** werden.

Gegen eine solche Wirkung könnt außerdem sprechen, dass die Anlegenden ihre Payment Token während der Spekulationsfrist weiterhin zum Lending oder Staking nutzen könnten. Das wäre aus der Sicht eines/einer rational handelnden Anlegerin zur Erzielung weiterer Einkünfte sinnvoll. Dadurch würde die Anzahl der Transaktionen nicht reduziert, da beim Lending/Staking auch Transaktionen notwendig sind, ohne dass sich die Besitzverhältnisse ändern.

Als weiterer Aspekt ist zu beachten, dass eine zehnjährige Spekulationsfrist sich für viele Anleger als **zu lang** erweisen könnte. Die Anlegenden könnten sich daher trotz der gesetzten steuerlichen Anreize zu einem **Verkauf vor Ablauf der Spekulationsfrist** gezwungen sehen. In der Folge würden die Veräußerungsgewinne besteuert. Die Verlängerung der Spekulationsfrist

könnte daher auch zu einem erhöhten Steueraufkommen führen, da die Anlegenden trotz der grundsätzlichen Steuerfreiheit nach zehn Jahren bereits vor Ablauf der Spekulationsfrist verkaufen würden. Die ursprünglichen Steuervorteile würden durch eine solche Maßnahme folglich abgebaut, da weniger Anleger in den Genuss eines steuerfreien Verkaufs kommen könnten. Darunter würde die steuerliche Attraktivität einer Anlage in Payment und Utility Token leiden. Durch einen solchen Nebeneffekt würden Anlagen in Payment und Utility Token aus steuerlicher Sicht disincentiviert.

Aus einer längeren Spekulationsfrist im Vergleich zu anderen Wirtschaftsgütern (z.B. Fremdwährungen und Edelmetalle, für die eine einjährige Spekulationsfrist gilt) würde außerdem ein **komparativer Nachteil** für Payment und Utility Token gegenüber anderen Anlageformen mit den zuvor beschriebenen Folgen (vgl. Abschnitt 5.4.8) entstehen. Die dadurch entstehenden Auswirkungen hängen aber wesentlich von der Vergleichbarkeit der Anlageklassen aus Sicht der Anleger ab. Nur wenn für Anlegerinnen eine Entscheidung zwischen Payment bzw. Utility Token und anderen Anlageklassen überhaupt in Betracht kommt, würde dieser komparative steuerliche Nachteil ins Gewicht fallen.

Im Vergleich zu dem Anreiz aus einer Transaktionssteuer ist der Anreiz aus einer Verlängerung der Spekulationsfrist auf zehn Jahre auf deutscher Ebene als deutlich stärker einzuschätzen. Zum einen müsste die Haltedauer deutlich verlängert werden (min. zehn Jahre). Zum anderen ist die steuerliche Belastung bei einem Verkauf vor Ablauf der Spekulationsfrist deutlich stärker, da der persönlicher Ertragssteuersatz höher als der Steuersatz der Transaktionssteuer.

Die entscheidende Belastung erwächst den Anlegern aber wohl nicht aus der Verlängerung der Spekulationsfrist auf zehn Jahre und dem damit verbundenen Anreiz für eine längere Haltedauer. Vielmehr ist entscheidend, dass zahlreiche Anlegende noch vor Ablauf der Haltefrist gezwungen sein könnten, ihre Token zu verkaufen. In einem solchen Fall wären sie im Vergleich zu anderen Anlageklassen aber erheblich belastet, da die Veräußerungsgewinne mit ihrem persönlichen Steuersatz besteuert würden. Die Veräußerungsgewinne anderer Wirtschaftsgüter (z.B. Fremdwährungen, Edelmetalle) wären aber nach einem Jahr steuerfrei.

#### Vergleich mit der steuerlichen Behandlung einer Veräußerung von anderen Wirtsgütern

Nach der bisherige steuerliche Einordnung sind Payment und Utility Token als Wirtschaftsgüter iSd § 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 EStG zu behandeln. Sie werden daher bspw. mit Fremdwährungsgeschäften steuerlich gleichbehandelt. Private Veräußerungsgewinne aus Fremdwährungsgeschäften werden ebenfalls nach § 23 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 EStG besteuert. Werden sie nach Ablauf der Spekulationsfrist veräußert, ist der Veräußerungsgewinn steuerfrei (vgl. Demuth/Jena, 2016, S. 205). Auch bei Fremdwährungsgeschäften beträgt die Haltefrist ein Jahr. Im Ergebnis werden daher Payment und Utility Token bisher **einheitlich mit Fremdwährungsgeschäften** behandelt. Ein ähnliches Ergebnis ergibt sich auch für Investitionen in **Edelmetalle**.

Daraus können sich **gleichheitsrechtliche Bedenken** ergeben, wenn für Payment und Utility Token eine längere Spekulationsfrist normiert würde. Der Gesetzgeber müsste nachvollziehbar begründen, warum Payment und Utility Token anders behandelt werden sollen als bspw. Fremdwährungen und Edelmetalle. Hierfür könnte vor allen Dingen auf die teils fehlenden Währungseigenschaften von Blockchain abgehoben werden (für Bitcoin: Gschnaidtner, 2021, Rn. 61 ff.).

#### Bewertung der Maßnahme

Die möglichen positiven Umweltfolgen aus einer Verlängerung der Spekulationsfrist sind unsicher. Im Ergebnis ist jedoch bei der Wirksamkeit zu betonen, dass eine Verlängerung der

Spekulationsfrist auf zehn Jahre gegenüber dem Status quo zumindest eine Verbesserung darstellen würde. Durch eine Verlängerung könnten negative Umweltanreize bei der Besteuerung von Payment und Utility Token abgebaut werden.

Die Maßnahme führt zu Marktverzerrungen, wenn die Vergleichbarkeit mit anderen Wirtschaftsgütern aufgehoben wird. Wie gezeigt wurde, sind die Kryptowerte gerade mit diesen Wirtschaftsgütern vergleichbar und sollten daher auch steuerlich gleich behandelt werden. In diesem Sinne ist die Effizienz als gering zu beurteilen.

Für eine Verlängerung der Spekulationsfrist spricht der geringe administrative Aufwand für die Steuerbehörden und der gleichbleibende Aufwand für Private. Bereits zum jetzigen Zeitpunkt müssen Anleger ihre Veräußerungsgewinne in der Steuererklärung angeben. Dementsprechend bestehen die administrativen Strukturen zur Durchsetzung der Steuer bereits und somit würde sich die **Umsetzung** als eher einfach erweisen. Allerdings besteht eine gewisse rechtliche Unsicherheit im Hinblick auf die Umsetzbarkeit der Maßnahme. Solange diese Bedenken nicht ausgeräumt werden können, stehen der Umsetzung der Maßnahme bedeutende Hindernisse entgegen, die eine Umsetzung erschweren oder gar verhindern.

#### **Alternative Ausgestaltung**

Statt einer Verlängerung der Spekulationsfrist käme auch eine **vollkommene Abschaffung** der Spekulationsfrist für Payment und Utility Token in Betracht (Hoppmann, 2024). In Folge des Wegfalls der Spekulationsfrist unterlägen Veräußerungsgewinne mit Kryptowerten immer einer Besteuerung. Eine solche Maßnahme wäre wie die Verlängerung der Spekulationsfrist darauf zu überprüfen, ob sie nicht einer gleichheitsrechtlich gebotenen Gleichbehandlung verschiedener Wirtschaftsgüter zuwiderlaufen würde.

Derzeit stellt die steuerfreie Veräußerung von Payment und Utility Token nach Ablauf einer Haltefrist von einem Jahr einen wesentlichen **komparativen Vorteil von Kryptowerten gegenüber anderen Anlageklassen** wie Aktien dar. Veräußerungsgewinne von Aktien unterliegen zu jeder Zeit der Besteuerung. Dies kann dazu führen, dass Anlegende eine Investition in Payment und Utility Token einer Investition in Aktien vorziehen. Dieser Vorteile der Kryptowerte gegenüber anderen Anlageklassen würde bei einem Wegfall der Spekulationsfrist aufgehoben. Investitionen in Kryptowerte wären dann steuerlich weniger attraktiv als Investitionen in andere Anlageklassen. Gegenüber der zuvor diskutierten Verlängerung der Spekulationsfrist ergeben sich aus einem ersatzlosen Wegfall der Spekulationsfrist keine Anreize für eine längere Haltedauer. Die daraus abgeleiteten Anreize gingen verloren. Aus steuerlicher Sicht könnte der Anleger zu jeder Zeit veräußern, ohne dass sich die steuerlichen Rahmenbedingungen verändern würden.

#### **5.4.10 Cap-and-Trade-System**

Ein wesentlicher Anreiz für die Reduktion des Energieaufwandes für Miner mit Sitz in Europa ergibt sich aus dem europäischen Treibhausgasemissionszertifikatehandel (EU-ETS). Man spricht bei einem solchen Handelssystem auch von einem Cap-and-Trade-System. Wie bereits ausgeführt wurde (vgl. Abschnitt 5.4.7), steht die Profitabilität von Miner, insbesondere der energieintensiven Miner, in einem engen Zusammenhang zu den Kosten, die ein Miner für die aufgewandte Energie tragen muss. Durch eine **Internalisierung der Kosten** für Treibhausgasemissionen können die mit dem Energieaufwand verbundenen Emissionen in die Bewertung der Akteure einfließen. Dies wird über das sog. Cap-and-Trade-Prinzip erreicht, das in Europa durch den EU-ETS und die entsprechenden nationalen Umsetzungsgesetze eingeführt wurde.

## Ausgestaltung der Maßnahme

In Folgen des EU-ETS müssen die Emittenten von Treibhausgasen ein Zertifikat vorweisen, das sie berechtigt diese Treibhausgase zu emittieren. Die Menge der verfügbaren Zertifikate ist limitiert. Ein solches Zertifikat können die Emittenten entweder zugeteilt bekommen oder am Markt erwerben. Die Zertifikate sind am Markt handelbar. Dadurch entsteht ein Preis für die Zertifikate und damit mittelbar auch für die Emission von Treibhausgasen. Durch ein solches Cap-and-Trade-System werden externe Effekte wie Umweltkosten bei den Emittenten internalisiert.

Das zentrale Defizit des EU-ETS liegt in dessen räumlich begrenzten Anwendungsbereich. Während die Energiekosten für europäische Akteure steigen, sind Akteure, die nicht vom EU-ETS erfasst sind, nicht von den steigenden Energiekosten betroffen. Dadurch nimmt die Wettbewerbsfähigkeit europäische Akteure im internationalen Vergleich ab. Um dieses Defizit auszugleichen, wurde für bestimmte (physische) Produkte ein **Grenzausgleichsmechanismus** (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) eingeführt (EU-Kommission 2024). Dadurch sollen auch Treibhausgasemissionen, die in Nicht-EU-Ländern entstanden sind, bei einer Einfuhr der Produkte in die EU ausgeglichen werden, sofern nicht bereits ein Ausgleich für die Treibhausgasemissionen bezahlt wurde (z.B. durch ein dem EU-ETS vergleichbares System im Herkunftsland).

Miner, die in der EU angesiedelt sind, wenden für das Mining Strom auf, dessen Erzeugung in den Anwendungsbereich des EU-ETS fällt. Fallen bei der Stromerzeugung Treibhausgasemissionen an, so müssen diese durch entsprechende Zertifikate ausgeglichen werden. Dadurch steigen die Energiekosten. Die **steigenden Energiekosten belasten** in der Folge die **Rentabilität der europäischen Miner** im Vergleich zur außereuropäischen Konkurrenz. Dies führt häufig dazu, dass energieintensive Miner ihre Aktivitäten in andere Länder mit geringeren Energiekosten verlagern. Aufgrund der Möglichkeit die digitalen Blockchain-Anwendungen aber weltweit anzubieten, können diese umweltschädlichen Anwendungen dennoch auf dem europäischen Markt angeboten werden. Die globalen Auswirkungen auf das Klima bleiben gleich.

An dieser Stelle könnte ein Grenzausgleichsmechanismus Abhilfe schaffen, der Unterschiede in den nationalen Cap-and-Trade-Systemen nivellieren könnte. Die Vorteile einer Verlagerung ins Ausland würden dadurch verringert bzw. für den europäischen Markt aufgehoben.

Ein **solcher Grenzausgleichsmechanismus** ist aber **für digitale "Produkte" nur schwer umsetzbar**. Es gibt keine "digitale Grenze" bei der ein entsprechender Mechanismus durch Grenzkontrollen durchgesetzt werden könnte. Die Frage des Ausgleichs klimaschädlicher Energieaufwände im Zusammenhang mit digitalen Produkten stellt sich nicht nur bei Blockchain-Anwendungen, sondern darüber hinaus auch bei anderen digitalen Anwendungen (z.B. KI-Anwendungen, Cloud-Infrastruktur). Der Betrieb zahlreicher solcher Anwendungen bedarf am Standort der Recheninfrastruktur erhebliche Energiemengen. Die Treibhausgasemissionen, die bei der Erzeugung des Stroms für diese Anlagen entsteht, werden aber nicht internalisiert, sofern die Stromerzeugung nicht einem Cap-and-Trade-System unterfällt. Daraus ergibt sich ein Standortnachteil für energieintensive IT-Anwendungen, die in Europa betrieben oder implementiert werden sollen (z.B. Training von KI-Lösungen). Die Treibhausgase werden schlicht in anderen Ländern emittiert, während die Nutzer als mittelbare Verursacher der Emissionen zu einem wesentlichen Teil aus europäischen Staaten stammen. Die daraus entstehenden Folgen durch die Treibhausgasemissionen haben aber wiederum eine globale Wirkung.

Um entsprechende Treibhausgasemissionen zu reduzieren, müssten auch bei solchen digitalen Gütern die Kosten für die Emission von Treibhausgasen internalisiert werden. Daraus würde dann ein Anreiz für eine Reduktion der Treibhausgasemissionen folgen. Eine solche Internalisierung der Kosten könnte erreicht werden, indem die Anbieter von digitalen Produkten auf dem europäischen Markt zur Kompensation der Treibhausgasemissionen, die bei der "Produktion" der digitalen Angebote entstehen, verpflichtet würden. Will eine Anbieterin eine digitale Leistung auf dem europäischen Markt anbieten, so müsste sie nachweisen, dass für die entstandenen Treibhausgasemissionen die entsprechende Anzahl an Zertifikate vorgehalten werden kann. Kann sie einen solchen Nachweis nicht führen, muss sie eine Ausgleichsgebühr bezahlen, die sich am aktuellen CO<sub>2</sub>-Marktpreis orientiert.

Die **Schwierigkeit** einer solchen **Nachweispflicht** besteht bei Blockchain-Anwendungen in der Beschaffung der notwendigen Informationen durch die Anbietenden. Durch die dezentrale Struktur ist es schwierig, die benötigten Informationen zu erlangen. Außerdem muss sichergestellt werden, dass der Nachweis lückenlos mit dem Produkt verbunden ist und nachvollzogen werden kann.

Dabei haben Blockchain-Anwendungen aber gegenüber anderen Produkten einen entscheidenden Vorteil aus der Sicht des Regulierenden. Durch die **lückenlose Nachverfolgbarkeit aller Transaktionen** ließe sich ein Nachweis auf der Blockchain hinterlegen, durch den für einen Token bewiesen werden kann, dass ein entsprechender Emissions-Ausgleich bereits bezahlt wurde. Fehlt ein entsprechender Nachweis, ist eine erneute Ausgleichsgebühr zu bezahlen. Die Beweislast müsste zur effektiveren Durchsetzung auf den Anbieter übertragen werden. Im Zweifel ist die Gebühr doppelt zu bezahlen. Dadurch entsteht auch für die Anbieter ein Anreiz, den entsprechenden Nachweis zu führen und technologische Lösungen zur Nachvollziehbarkeit zu implementieren.

In der Gesamtheit betrachtet ist ein solches System im Ausgangspunkt **lückenhaft** und stellt die Akteure vor **nicht unerhebliche Herausforderungen**. Es muss technologisch geklärt werden, ob ein entsprechender Nachweis geführt und eine Doppelbelastung vermieden werden kann. Der Gesetzgeber kann lediglich die regulatorischen Rahmenbedingungen setzen, die einen Nachweis über den Ausgleich verlangen. Bei gleichbleibender Nachfrage nach den Blockchain-Anwendungen aus Europa ist zu erwarten, dass Anbietenden von Blockchain-Anwendungen sich bemühen werden, technologische Möglichkeiten zu finden, um einen entsprechenden Nachweis zu führen. Andernfalls könnte es ihnen untersagt werden die Anwendungen im europäischen Markt anzubieten (vgl. hierzu aber Abschnitt 5.4.1).

### **Anreize und Umweltwirkung**

Die entscheidenden Adressaten einer solchen Maßnahme wären die Miner, die die Konsensmechanismen der Blockchain betreiben. Sie können entscheiden, welche Energiequellen sie für den Betrieb des Konsensmechanismus einsetzen. Durch eine entsprechende Nachweispflicht werden die Kosten für die Treibhausgasemissionen internalisiert. Entweder sind entsprechende Kosten bereits bezahlt und belasten somit unmittelbar den Betreiber des Miner oder der erwerbende Nutzer muss eine entsprechende Gebühr erst noch bezahlen. In diesem Fall wird sie vom Verkaufenden einen entsprechenden Kostenabschlag verlangen, um die Kosten nicht allein tragen zu müssen. In beiden Fällen entsteht ein Anreiz für den Miner die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Blockchain-Anwendungen, die auf fossilen Energiequellen beruhen, verlieren dadurch gegenüber Blockchain-Anwendungen, die grüne Energiequellen nutzen, an Attraktivität, da die Rendite geschmälert wird.

Aus einer solchen Maßnahme sind **starke Anreize** für eine Umstellung auf erneuerbare Energieträger zu erwarten. Durch die marktbasieren Kosten für Treibhausgasemissionen

können die Kosten der Umweltauswirkungen internalisiert und an die Betreibenden der Miner weitergereicht werden. Diese werden aus wirtschaftlichen Gründen versuchen ihre Kosten zu reduzieren.

Sofern ein Umstieg auf nicht-fossile Energiequellen kostengünstiger wäre als die Kompensationszahlung, werden die Miner auf nicht-fossile Energiequellen umsteigen. Im Ergebnis würden die Treibhausgasemissionen bspw. durch einen **Wechsel der Energiequelle** erheblich reduziert.

### **Bewertung der Maßnahme**

Unterstellt man die Umsetzbarkeit einer solche Maßnahme, wäre sie sehr **wirksam**. Aus dem EU-ETS entstehen starke Anreize für die Reduktion der Treibhausgasemissionen bei der Energieerzeugung. Die hier vorgeschlagene Maßnahme versucht Umgehungsmaßnahmen, wie einer Verlagerung des energieintensiven Minings, entgegenzuwirken. Dadurch sollen die Anreize des EU-ETS auch auf Miner außerhalb des Anwendungsbereichs des EU-ETS übertragen werden.

Ein grundlegendes Defizit des EU-ETS ist seine beschränkte Anwendbarkeit auf die europäischen Stromerzeuger, die unmittelbar in dessen Anwendungsbereich fallen. Dadurch droht auch hier wieder eine **Verlagerung der Aktivitäten von Miner**, die von geringen Energiekosten abhängig sind, aus dem Anwendungsbereich des EU-ETS. Die hier vorgeschlagenen Mechanismen sollen einer solchen Verlagerung vorbeugen oder sie zumindest abzumildern, indem auch für Treibhausgasemissionen außerhalb des Anwendungsbereichs des EU-ETS Kosten internalisiert werden.

Von einer solchen Maßnahme wäre eine **starke Anreizwirkung für einen nachhaltigeren Einsatz von Blockchain** zu erwarten. Je stärker der Preis für Emissionszertifikate steigt, desto stärker wird diese Anreizwirkung. Bei einer effektiven Umsetzung entstünde durch eine Verteuerung der Verwendung von fossilen Energieträgern ein starker Anreiz für eine **Umstellung auf erneuerbare Energieträger**. Eine entsprechende Maßnahme wäre des Weiteren **technologieneutraler** als andere Lösungen und würde den Weg zu geringeren Treibhausgasemissionen der Entscheidung der Marktakteure überlassen. POW-basierte Konsensmechanismen wären nicht verboten, sie würden nur wirtschaftlich unattraktiver solange sie fossile Energiequellen nutzen. Dadurch bliebe es der Entscheidung der Marktakteure überlassen, ob sie die entsprechenden monetären Nachteile in Kauf nehmen oder Gegenmaßnahmen ergreifen.

Besonders zu betonen ist, dass der Anreiz einer Internalisierung von Treibhausgasemissionen an der richtigen Stelle ansetzt. Die Treibhausgasemissionen entstehen nämlich weder bei der Nutzung der Blockchain-Anwendungen noch beim Betrieb des Konsensmechanismus. Vielmehr entstehen sie bei der Erzeugung des erforderlichen Stroms. Es würde aber durch eine Verteuerung fossiler Energiequellen gerade ein Anreiz entstehen, auf andere, erneuerbare Energiequellen umzusteigen. Der Betrieb von energieintensiven Konsensmechanismen ist nicht von sich aus umweltschädlich, sofern hierfür erneuerbare Energiequellen gewählt werden. Lediglich bei einer Nutzung von fossilen Energieträgern sind Blockchains mit massiven negativen Folgen für die Umwelt verbunden. Ein hoher Energieaufwand kann bei einer Umstellung auf grüne Energiequellen in Kauf genommen werden. In dem der Betrieb von Blockchain nicht verboten wird, bleibt es den Marktteilnehmenden überlassen, ob sie bereit sind den Preis für die Umweltauswirkungen zu bezahlen. Andernfalls würden umweltschädliche Blockchains durch die Bepreisung von Treibhausgasemissionen mit einem stetig steigenden Preis nach und nach aus dem Markt gedrängt. Die Maßnahme wäre daher sehr **effizient**.

Gegen eine solche Maßnahme sprechen aber erhebliche Bedenken bei der **Umsetzung**. Die Maßnahme droht **lückenhaft** zu bleiben. Sie wäre nur mit einem **gewissen Aufwand** durchsetzbar. Um eine Durchsetzung sicherzustellen, sind technologische Fortschritte notwendig, die es ermöglichen einen einmal bezahlte Treibhausemissionsausgleich

nachzuweisen und eine Doppelbelastung der Akteure zu vermeiden. Die Schwierigkeiten einen Nachweis zu führen, sind umso grösser, je mehr Transaktionen mit einem Kryptowert durchgeführt wurden. Bei solchen Transaktionen werden die Coins nicht selten geteilt. Auch nach einer solchen Teilung müsste sichergestellt werden, dass weiterhin ein Nachweis über einen bereits geleisteten Treibhausgasausgleich geführt werden kann. Entsprechende technologischen Entwicklungen, die einen Nachweis ermöglichen würden, bleiben abzuwarten. Es ist zu erwarten, dass Miner, die bereits durch grüne Energieträger unter geringem Treibhausgasemissionen den Konsensmechanismus betreiben, die Implementierung solcher Nachweise weiter forcieren werden, da sich daraus für sie ein Wettbewerbsvorteil ergeben würde.

Darüber hinaus müssten die administrativen Voraussetzungen für eine Überwachung der Maßnahmen geschaffen werden. Alternativ ist aber auch eine private Durchsetzung über Klagebefugnisse von Verbraucher- oder Umweltverbänden denkbar.

Da jedoch die Umsetzung der Maßnahme nicht sichergestellt werden kann, wäre die Maßnahme in der Folge sehr lückenhaft. Die erhofften Wirkungen würden dann nicht eintreten. Die Akteure könnten sich durch eine Verlagerung ins Ausland der Wirkung des Anreizes entziehen. Es wären dann zwar womöglich einige positive Auswirkungen festzustellen, diese wären aber nur gering oder würden lediglich indirekt wirken.

## 5.5 Zwischenfazit

Während Blockchain in einigen Fällen als Lösung für Nachhaltigkeitsprobleme betrachtet (vgl. Ökodesgin-VO) wird, können die mit POW-basierten Blockchain verbundenen negativen Umweltwirkungen nicht von der Hand gewiesen werden. Der Energieaufwand, die damit verbundenen Treibhausgasemissionen und der Ressourcenverbrauch stehen einer nachhaltigen Nutzung von POW-basierter Blockchain derzeit entgegen.

Die Regulierung kann im vorliegenden Fall aus ökonomischer Sicht mit **Marktversagen** gerechtfertigt werden. Marktversagen kann auftreten, wenn Ressourcen wie saubere Luft gleichzeitig frei verfügbar (d.h. nicht ausschließbar) und begrenzt (d.h. rivalisierend) sind. In solchen Fällen können Individuen nicht davon abgehalten werden, die Ressourcen zu nutzen, während gleichzeitig ökonomische Kosten entstehen, die von der Gesellschaft getragen werden müssen. Dann treten externe Effekte auf, da die von Marktakteuren wahrgenommenen privaten Kosten oder der private Nutzen nicht den gesellschaftlichen Kosten oder dem gesellschaftlichen Nutzen entsprechen. Nicht ausschließbare und rivalisierende Güter (sog. **Allmendegüter**) werden in der Regel übernutzt, da die Individuen die Kosten nicht oder nur zu einem Bruchteil selbst tragen müssen. Ein weiterer Aspekt des Marktversagens sind die bestehenden **Informationsasymmetrien**, die es den Akteuren in Ermangelung der notwendigen Informationen nicht ermöglichen, eine ihren Präferenzen entsprechende Entscheidung zu treffen. Regulierung kann dazu beitragen, die Übernutzung zu reduzieren und Informationsasymmetrien auszugleichen.

Da Regulierung mit volkswirtschaftlichen Kosten einhergehen kann, müssen die Kosten mit der Wirkung der Regulierung in ein Verhältnis gesetzt werden. Regulierung sollte **effizient** sein, d.h. die Kosten sollten im Verhältnis zu ihrer Wirkung möglichst gering sein. Überwiegen die Kosten den Nutzen, so sollte eine Regulierung nicht implementiert werden. Dabei sollte möglichst auf die Technologieneutralität der Regulierung geachtet werden, um den Marktteilnehmenden die Entscheidung über die effizienteste Lösung zu überlassen. Ziel der Regulierung im Umweltbereich ist die Behebung des **Marktversagens** im Umgang mit **Umweltressourcen**. In Bezug auf die Blockchain soll somit sichergestellt werden, dass die Umweltbelastungen auf das

volkswirtschaftliche Optimum reduziert werden kann. Im Idealfall dadurch, dass die verursachten Externalitäten in die Kostenkalkulation der Anbieter oder Nachfrager einfließen und somit internalisiert werden. Außerdem soll sichergestellt werden, dass sich die Nutzer und Nutzerinnen der Umweltauswirkungen von Blockchain bewusst sind, damit sie informierte Entscheidungen treffen können.

Hierzu wurden abstrakte Maßnahmen identifiziert, die als sog. **Second-Best Maßnahmen** zu einem nachhaltigeren Einsatz von Blockchain führen können. Dies umfasst eine Umstellung des Konsensmechanismus, die Umstellung der Hardware, die Nutzung von erneuerbaren Energiequellen, der effiziente Einsatz von Rechenkapazitäten und die Ermöglichung alternativer Lösungen.

Die **Entwicklung konkreter Maßnahmen**, um das Ziel eines nachhaltigen Einsatzes von Blockchain zu erreichen, ist mit **erheblichen Herausforderungen** verbunden. Dezentralität, Internationalität und Pseudonymität der Akteure sind typische Merkmale von Blockchains. Damit treffen drei Faktoren bei Blockchain zusammen, die eine effiziente und wirksame Regulierung erschweren oder gar verhindern können. Die Dezentralität von Blockchain ermöglicht die Internationalität, die einen effektiven Zugriff durch einzelne Rechtsordnungen verhindert. Regionale Lösungen stehen aufgrund ihres begrenzten Anwendungsbereichs vor der Schwierigkeit, dass die betroffenen Akteure leicht in andere Jurisdiktionen ausweichen können (vgl. 5.2.2). Digitale Verhaltensweisen sind nur schwer fassbar und können leicht über territoriale Grenzen hinweg genutzt werden.

Die Analyse zeigt, dass **lokale angebotsbezogene Maßnahmen** aufgrund der Verlagerungsproblematik eine geringere unmittelbare globale Wirksamkeit aufweisen können als nachfragebezogene Maßnahmen. Zwar werden dadurch die lokalen Umweltwirkungen (insbesondere Treibhausgasemissionen) reduziert, die verringerten Angebotskapazitäten in einer Region können jedoch durch substituierende Zuwächse in anderen Regionen ausgeglichen werden. Allein globale Lösungen können hier einen globalen Effekt zeitigen. Demgegenüber können **nachfragebezogene Maßnahmen** auch Auswirkungen über ihren Anwendungsbereich hinaus haben. Eine Verringerung der europäischen Nachfrage führt zu einer globalen Nachfragereduktion, die dann nicht ohne Weiteres von ausländischen Akteuren kompensiert werden kann. Daher ist die globale Wirksamkeit dieser Maßnahmen höher einzuschätzen (vgl. Umweltlabel, Dienstleistungsverbot, Transaktionssteuer). Dies hängt wesentlich mit der nach unterschiedlichen Ebenen zu differenzierenden Bedeutung des deutschen bzw. europäischen Marktes auf das globale Phänomen "Blockchain" und dabei insbesondere Kryptowerten zusammen. Nur ein Bruchteil des Mining findet in Deutschland statt. Der Hebel der deutschen bzw. europäischen Regulatorik dürften daher eher die **Nutzer** bzw. **Anleger** sein, die in Blockchain-Anwendungen investieren. Durch das Nutzer- bzw. Anlegerverhalten wird das Verhalten der Miner mittelbar mit beeinflusst.

Gleichzeitig erschweren die dezentrale Verteilung und die Pseudonymität der Akteure die Durchsetzung der ergriffenen Maßnahmen und die Sanktionierung von Verstößen. Die dadurch beschriebene Leakage-Problematik könnte sich im schlechtesten Fall zu einem "strukturellen Vollzugsdefizit" entwickeln. Das könnte zur Verfassungswidrigkeit der Maßnahme führen, falls dadurch ein Grundrecht – wie z.B. der Gleichheitssatz – verletzt wird.

Die beschriebenen einzelnen Faktoren beeinflussen und verstärken jeweils gegenseitig die Schwierigkeiten eine effiziente und wirksame Regulierung zu finden. Trotz dieser Schwierigkeiten wurden verschiedene **konkrete Maßnahmen** aus dem politischen Diskurs aufgegriffen und weitere Maßnahmen aus zum Teil bestehenden Konzepten entwickelt.

Die vorstehende Analyse hat ergeben, dass bei der Regulierung von Blockchain zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen ordnungsrechtliche Verbote nur in Erwägung gezogen werden sollten, wenn das volkswirtschaftliche Optimum eine Einstellung der Aktivität ist. Ist dies nicht der Fall kommt es zu erheblichen Marktverzerrung. Weiterhin beschränkt sich die Wirksamkeit vor allem auf die europäische Ebene, wobei auch politische Signalwirkungen möglich sind.

Neben gesetzlich erlassenen ordnungsrechtlichen Maßnahmen können einige Maßnahmen auch durch **Selbstverpflichtungen** der Akteure erreicht werden. Die Wirksamkeit dieser Selbstverpflichtungen hängt allerdings wesentlich von der Ausgestaltung der Maßnahmen und dem erreichten Ambitionsniveau ab. So könnten sich die Blockchain-Akteure auch selbst zur Nutzung eines Umweltlabels oder zu bestimmten Nachweisen für den Emissionsausgleich verpflichten. Aufgrund ihrer hohen Akzeptanz kann dieser Weg unter Umständen gegenüber einer hoheitlichen Regulierung vorzugswürdig sein. Ein höheres Ambitionsniveau kann dabei insbesondere durch eine aktive Begleitung der selbstregulierenden Bemühungen der Betroffenen erreicht werden, indem vom Gesetzgeber bestimmte Mindeststandards gesetzlich festgelegt werden, die dann durch die Betroffenen weiter ausgestaltet werden. Ein solcher Ansatz wurde beispielsweise auch im Data Act für die Ausgestaltung der Anforderungen an bestimmte Smart Contracts gewählt (vgl. Art. 36 DA, s. für diese Kaskadenstruktur bei der Standardisierung im Data Act auch Schneider et al., 2024).

Aus umweltpolitischer Sicht hätte ein globales Verbot des Minings, des Handels oder des Besitzes von POW-basierten Kryptowerten eine hohe Wirksamkeit. Dies wäre allerdings am schwierigsten umzusetzen, da sich einige Länder klar gegen ein Verbot dieser Kryptowerte aussprechen. Gleichzeitig wären mit einer solchen Maßnahme erhebliche Kosten verbunden. Im Vergleich dazu wären Maßnahmen innerhalb der EU einfacher umzusetzen. Innerhalb der EU würden nachfragebezogene Maßnahmen (die auf Besitz und Handel abzielen) voraussichtlich eine höhere globale Wirksamkeit erzielen als angebotsbezogene Maßnahmen (die auf Mining abzielen). Bei den Minern entfällt nur ein kleiner Anteil auf die EU bzw. Deutschland, weshalb hier regulatorische Maßnahmen nur eine geringere Wirkung versprechen. Demgegenüber kommt ein größerer Anteil der Anleger aus der EU bzw. Deutschland. Sie können somit unmittelbar durch die deutsche bzw. unionale Gesetzgebung adressiert werden.

Als nachfragebezogene Maßnahmen können informatorische Instrumente (Umweltlabel und Informationskampagne) einen gewissen Beitrag zu einem nachhaltigeren Einsatz von Blockchain leisten. Sie können zu moderaten Kosten implementiert werden und sind auch auf europäischer Ebene leicht umsetzbar.

Die Analyse zeigt, dass eine Regulierung des Minings idealerweise direkt am Ursprung der Umweltwirkungen ansetzen sollte. Dadurch können die entstehenden Kosten den Verursachern angelastet und internalisiert werden, was wiederum zu einem Rückgang der Nachfrage führt. Gelingt dies, spricht man vom sogenannten **First-Best Zustand**, da er den Akteuren die Allokation selbst überlässt. Um eine zielgerichtete und effiziente Regulierung zu gewährleisten, sollte daher möglichst der First-Best Zustand angestrebt werden. Ist dies nicht realisierbar, kommen Second-Best Maßnahmen zum Einsatz, die in der Analyse ebenfalls berücksichtigt wurden.

Eine theoretische Möglichkeit zur Erreichung des First-Best Zustands besteht in der Internalisierung der Kosten für knappe Umweltressourcen bspw. durch den europäischen Treibhausgasemissionszertifikatehandel (EU-ETS). Eine solche Maßnahme würde das Regulierungsziel optimal, **wohlfahrtsmaximierend** und **ökonomisch effizient** umsetzen.

Die Analyse des EU-ETS hat jedoch gezeigt, dass eine umfassende Regulierung des Energielieferanten für Blockchain in der Regel nicht möglich oder jedenfalls nur teilweise

wirksam ist. Lokale Lösungen zur Internalisierung der Umweltkosten können nicht zu einer umfassenden Problemlösung beitragen. Die Akteure entziehen sich der Regulierung durch eine Verlagerung der energieintensiven Produktionsprozesse ins Ausland, entweder unmittelbar durch eine Verlagerung der eigenen Aktivitäten oder mittelbar, indem die bestehenden Akteure aus dem Markt gedrängt werden. Ein Cap-and-Trade-System kann daher nur als globale Maßnahme die angestrebte Internalisierung der Umweltkosten erreichen. Die Maßnahme hat sich zwar als nur schwer umsetzbar erwiesen, wäre allerdings besonders wirksam. Daher sollten weitere Forschungsbemühungen darauf gerichtet werden, wie sich Grenzausgleichssysteme zur Internalisierung von Umweltkosten auf digitale Anwendungen übertragen lassen.

Die fehlende Möglichkeit die Umweltkosten bei digitalen Lösungen zu internalisieren, indem die stromintensiven Prozesse in Länder ohne Ausgleichsmechanismus und mit geringem Strompreis verlagert werden, ist **kein Blockchain-spezifisches Problem**, sondern kann auf digitale Plattformen, Cloud-Lösungen und KI-Modelle gleichermaßen übertragen werden. Die digitalen Lösungen sind analogen Produkten bei der Vermeidung von Regulierungsmaßnahmen in einem wesentlichen Punkt überlegen: Aufgrund ihrer digitalen Verbreitung wird keine Grenze überschritten, an der ein Grenzausgleich zu bezahlen wäre. Um die begrenzten Anwendungsbereiche eines Cap-and-Trade-Systems daher auch für digitale Produkte auszugleichen, müssen hier Lösungen entwickelt werden. Dann wäre auch eine effiziente Internalisierung der Umweltkosten bei digitalen Produkten möglich.

## 6 Schlussfolgerungen

Die Distributed Ledger Technologie bzw. Blockchain im Besonderen wird als zukunftsweisende und innovative Technologie mit einer Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten angesehen. Sie findet primär im Finanzsektor Anwendung, da sie den Austausch von Werten ohne Intermediär ermöglicht. In anderen Bereichen konnte sie sich jedoch bislang nicht in gleichem Ausmass durchsetzen. Je nach Ausgestaltung gehen Blockchain-Anwendungsfälle mit erheblichem Ressourcen- und Energiebedarf einher und können damit Umwelt- und Klimaschäden verursachen. Aus diesem Grund hat sich dieses Projekt mit den Umweltauswirkungen von Blockchain-Anwendungsfällen befasst.

Das vorliegende Projekt verfolgte zwei Hauptziele: Erstens soll der Ressourcen- und Energiebedarf von Blockchain-Anwendungsfällen ermittelt werden, um ein grundlegendes Verständnis ihrer Umweltauswirkungen zu entwickeln. Zweitens sollen mögliche Rahmenbedingungen für umweltfreundliche Blockchain-Lösungen diskutiert werden.

Im ersten Teil der Studie wurde zu diesem Zweck die Grundlagen geschaffen, um ein Modell zur Messung der Umweltauswirkungen der Blockchain zu entwickeln. Dieses Modell wurde dazu verwendet, um vier Anwendungsfälle mittels eines Life-Cycle-Assessment zu evaluieren und mit alternativen Anwendungen zu vergleichen. Im zweiten Teil wurden bestehende Regulierungen analysiert und mögliche alternative Regulierungsansätze diskutiert.

### Ermittlung der Umweltwirkung von Blockchain-Anwendungsfällen

In einem ersten Schritt wurden bestehende Berechnungen zu den Umweltwirkungen von Blockchain-Anwendungsfälle einer Analyse unterzogen. Dabei zeigte sich, dass bereits eine Vielzahl solcher Berechnungen existiert, die sich jedoch lediglich auf Teilaspekte wie etwa die Nutzungsphase beziehen. Der Ressourcenaufwand für die Herstellung der Hardware ist jedoch nicht unerheblich, weshalb wir ein Modell entwickelt haben, das sowohl die Umweltauswirkungen der Nutzungsphase als auch die Herstellungsphase von Blockchain-Anwendungsfällen abbilden kann. Das Modell berechnet Kennzahlen zum Energieaufwand, zu den Treibhausgasemissionen sowie den Rohstoffaufwänden für Proof-of-Work- und Proof-of-Stake-Blockchains. Es basiert auf einer Kombination etablierter Berechnungen zur Ermittlung des Energieaufwands in der Nutzungsphase mit der bestehenden Methodik des UBA zur Ermittlung der Auswirkungen der Herstellungsphase aus früheren Projekten über Rechenzentren und Cloud Computing. Das Modell ist dynamisch aufgebaut und kann auf verschiedene Proof-of-Work- und Proof-of-Stake-Blockchains angewandt werden, da es Bottom-up auf der Spezifikation der Hardware, der Software und der Größe einer Blockchain basiert.

Das Modell wurde zur Berechnung von vier verschiedenen Blockchain-Anwendungsfällen verwendet und mit den Ergebnissen von Bewertungen möglicher nicht-Blockchain-basierter Alternativen verglichen. Die untersuchten Fälle – Bitcoin, Ethereum, P2P-Energiemärkte und digitaler Green Bond – wurden ausgewählt, um eine breite technologische Vielfalt abzubilden und aktuelle relevante Aspekte zu berücksichtigen.

Der erste analysierte Anwendungsfall, **Bitcoin**, verwendet einen Proof-of-Work-Konsensmechanismus und wird als resilientes, dezentrales Zahlungs- und Wertübertragungssystem genutzt. Das Modell zeigt, dass dieser Konsensmechanismus durch einen sehr hohen Bedarf an Umweltressourcen gekennzeichnet ist. Dies im Vergleich zu anderen Blockchain-Lösungen, aber auch im Vergleich zu traditionellen Zahlungslösungen wie PayPal. Für den hohen Bedarf an Umweltressourcen ist vor allem die Nutzungsphase verantwortlich, da Bitcoin zur Bereitstellung der notwendigen Sicherheit sehr viel Energie benötigt: Eine

Transaktion über Bitcoin benötigt über tausendmal mehr Energie als eine Transaktion über PayPal.

Dies im Gegensatz zum zweiten Anwendungsfall: **Ethereum** dient ebenfalls als Zahlungsplattform, wird aber auch für den Transfer von Wertpapieren und die Ausführung von Smart Contracts verwendet. Dieser Anwendungsfall basiert auf dem Proof-of-Stake-Konzept, das Einlagen als Sicherheit verwendet und damit deutlich weniger Energie als Bitcoin benötigt. Allerdings enthält auch Ethereum aufgrund seiner Dezentralität viele Redundanzen und eignet sich aufgrund seines Designs nicht für reine Rechenoperationen. Da jedoch grundsätzlich Zahlungen und Wertschriften unabhängig von Intermediären abgewickelt werden können, kann sie, wie der Vergleich mit PayPal zeigt, auch gegenüber herkömmlichen Lösungen aus Umweltsicht vorteilhaft sein, zumindest sofern sie diese bzw. Teile von diesen substituieren kann.

Im Rahmen des dritten Anwendungsfalls untersuchten wir **P2P-Märkte**, die mittels Blockchain-Technologie implementiert werden. Das Beispiel „Quartierstrom“ zeigt, dass eine private Blockchain generell weniger Umweltressourcen benötigt als eine öffentliche Blockchain. Die geringeren Umweltauswirkungen sind hauptsächlich auf die kleine Netzwerkgröße und den Einsatz einfacher Hardware (wie etwa dem Raspberry Pi) zurückzuführen. Es zeigt sich jedoch auch, dass zentrale Lösungen eine bessere Performance aufweisen, insbesondere da auch private Blockchains mit Redundanzen arbeiten. Die Unterschiede sind allerdings geringer als bei öffentlichen Blockchains.

Schließlich wurde ein Anwendungsfall im Bereich **Green Bonds** analysiert. Hierbei wurde insbesondere der Handel auf Sekundärmärkten auf Basis der Ethereum-Blockchain (Proof-of-Stake) betrachtet. Digitale Green Bonds bergen das Potenzial, vermehrt Investitionen in den Ausbau von erneuerbaren Energien anzuziehen. Studien heben hierbei die Vorteile der Blockchain hervor, insbesondere die erhöhte Transparenz, die zu mehr Vertrauen und Investitionen führt. Die Berechnungen des entwickelten Modells zeigen, dass der Einsatz von Blockchain effizient sein kann, und die beschriebenen positiven Effekte nicht durch die benötigten Umweltressourcen der Blockchain aufgewogen werden.

Die vier Anwendungsfälle illustrieren die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Verbrauch von Umweltressourcen: Konsensmechanismus und redundante Berechnungen. Blockchains, die für den Konsensmechanismus Energie als Sicherheit verwenden, schneiden ohne weitere Maßnahmen (z.B. Aggregation von Transaktionen) hinsichtlich der Umweltauswirkungen schlechter ab als zentralisierte Lösungen. Dagegen können Blockchain-Lösungen, die auf anderen Konsensmechanismen als Proof-of-Work basieren, trotz redundanter Berechnungen eine bessere Umweltbilanz aufweisen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn sie traditionelle Finanzdienstleistungen oder zumindest Teile davon ersetzen.

Hinsichtlich der Berechnungen ist zu berücksichtigen, dass die Analyse auf Schätzungen basieren, da die Blockchain dezentral organisiert ist. Die Ergebnisse sind daher als Tendenzen zu interpretieren. Das Modell berücksichtigt zwar verschiedene Faktoren, stößt jedoch insbesondere bei der präzisen Abschätzung des verwendeten Energiemixes sowie der exakten Definition der verwendeten Hardware und Software an seine Grenzen. Trotz dieser Limiten lassen sich jedoch robuste Aussagen treffen. Insbesondere zeigt sich, dass Bitcoin mit hohen Umweltauswirkungen verbunden ist.

Staatliche Stellen sind verfassungsrechtlich verpflichtet durch gesetzgeberische Maßnahmen eine Transformation zu nachhaltiger Wirtschaft anzustoßen und regulatorische Maßnahmen zu ergreifen, um negative Umweltwirkungen abzumildern. Entsprechende Maßnahmen zur Regulierung von Blockchains wurden im zweiten Teil der Studie diskutiert. Die Blockchain kann

möglicherweise auch einen Beitrag zur Lösung von Umweltproblemen leisten. Deshalb wurde vorab auf die zivil- und datenschutzrechtlichen Herausforderungen von Blockchain-basierten Smart Contracts eingegangen.

### **Zivil- und datenschutzrechtliche Anforderungen**

Zivilrechtlich sind zwei Einsatzformen von Smart Contracts zu unterscheiden: Sie können beim Abschluss von Verträgen oder bei der automatisierten Vertragsdurchführung zur Anwendung kommen. Smart Contracts sind grundsätzlich keine Verträge im Rechtssinne, sondern Computerprogramme. Damit ein Vertrag im Rechtssinne vorliegen und der Smart Contract rechtliche Wirkungen erzeugen kann, müssen die tatsächlichen Vorgänge des Computerprogramms rechtliche Voraussetzungen für den Vertragsschluss erfüllen. Soll ein Smart Contract der Durchsetzung von Verträgen dienen, so müssen sich die im Programm niedergelegten Vorgänge an die rechtlich zwingenden Voraussetzungen für die Vertragsdurchführung halten.

Grundlegende zivilrechtliche Bedenken stehen dem Einsatz von Smart Contracts im Rechtsverkehr nicht entgegen. Smart Contracts können beim Vertragsschluss Anwendung finden, solange keine strengere Form als die Textform (Art. 126b BGB) verlangt wird. Bei der Vertragsdurchführung besteht grundsätzlich Vertragsfreiheit (Art. 2 Abs. 1 GG), sodass die Parteien in den Grenzen des zwingenden Rechts beliebig den Einsatz von Smart Contracts regeln können. Schwierigkeiten können sich hier vor allen Dingen bei Selbstdurchsetzungsklauseln, Preisanpassungsklauseln und der Rückabwicklung rechtsunwirksamer Transaktionen ergeben.

Blockchain-Anwendungen fallen in der Regel in den Anwendungsbereich der DS-GVO und müssen daher datenschutzrechtliche Anforderungen erfüllen. Insgesamt zeigt sich jedoch eine begrenzte praktische Vereinbarkeit der DS-GVO mit dezentralen Datenverarbeitungsmodellen. So wurde die DS-GVO für zentrale Datenverarbeitungsmodelle entwickelt und führt daher zu zahlreichen Konflikten zwischen der Blockchain und dem Datenschutz. Überall dort, wo eine nachträgliche Veränderung der Daten gefordert wird, kommen Blockchains aufgrund der Unveränderlichkeit der Inhalte an die Grenzen der technischen Umsetzbarkeit einer Durchsetzung der Betroffenenrechte. Permissionless Blockchains sind daher regelmäßig als datenschutzwidrig einzustufen. Durch die Gestaltung der Blockchain als permissioned Blockchains können die datenschutzrechtlichen Konflikte abgemildert oder gar überwunden werden. Zu bedenken ist allerdings, dass solche permissioned Blockchains häufig mit Nachteilen im Hinblick auf die Sicherheitsarchitektur verbunden sind und zahlreiche Vorteile der Blockchain-Technologie verloren gehen.

### **Analyse des Rechtsrahmens und Anpassung des regulatorischen Rahmens**

Beim Einsatz von Blockchain kann es aufgrund der fehlenden Internalisierung von externen Effekten auf die Umwelt und aufgrund von Informationsasymmetrien zwischen den Marktakteuren zu Marktversagen kommen. Entsprechend können sich aus ökonomischer Sicht Markteingriffe rechtfertigen.

Die Analyse des derzeitigen Rechtsrahmens ergibt, dass die negativen Umweltwirkungen von Blockchains im regulatorischen Rahmen in Deutschland zwar erfasst sind, jedoch nur unzureichend. Zwar besteht mit dem EU-ETS eine Maßnahme, die versucht das identifizierte Marktversagen zu vermindern. Von dieser Maßnahme betroffen sind jedoch nur **Mining-Aktivitäten** innerhalb der EU. Findet das Mining außerhalb Europas statt, so greift diese Regelung, wie bei anderen digitalen Angeboten, nicht. Die Erhöhung der Energiepreise aufgrund des EU-ETS innerhalb der EU können deshalb zu einer Verlagerung des Mining ins Ausland führen und somit die Regulierung aushebeln („Carbon Leakage“).

Ausgehend von diesem regulatorischen Defizit wurden Maßnahmen sowie deren Vor- und Nachteile diskutiert. Hierzu wurden Vorschläge aus Literatur und Politik aufgegriffen und – in Abstimmung mit dem UBA verschiedene Maßnahmen identifiziert, die zum Ziel haben, das Marktversagen zu reduzieren.

Erhebliche Herausforderungen für eine wirksame Regulierung stellen dabei die Dezentralität, Internationalität und Pseudonymität von Blockchains dar. Häufig muss die Regulierung auf die Unterstützung durch zentrale (professionelle) Intermediäre zurückgreifen, um die Maßnahmen durchsetzen zu können. Solche Akteure sind bei permissionless Blockchains (Dezentralität) nicht zwingend vorhanden. Die Regulierung ist deshalb schwieriger durchzusetzen.

Als **First-Best Optionen** wurden Maßnahmen identifiziert, die direkt beim Ressourcenaufwand (Energie bzw. seltene Erden) ansetzen und dadurch zur direkten Internalisierung der externen Effekte führen, ohne weitere Marktverzerrungen zu verursachen. Eine solche Internalisierung könnte theoretisch durch ein **globales Cap-and-Trade-System** erreicht werden. Der Regulator beschränkt sich hierbei auf die Festlegung der maximal zugelassenen globalen Umweltwirkung („Cap“). Die Internalisierung der externen Effekte bzw. die Anpassung an die Mengenbeschränkung wird den einzelnen Akteuren auf dem Markt überlassen („Trade“). Dadurch wird eine effiziente Allokation der Ressource Umwelt erzielt. Mit Ausnahme der Festlegung der Obergrenze setzt eine solche Maßnahme nur wenige Informationen bei der regulierenden Behörde voraus. Diese Maßnahme hat zudem den Vorteil, dass sie unerwünschte Nebenfolgen wie Verzerrungen auf angrenzenden Märkten verringert und entsprechend mit geringen ökonomischen Kosten verbunden ist.

Ein globales Cap-and-Trade-System dürfte jedoch aufgrund unterschiedlicher Interessen zwischen den Ländern schwierig umzusetzen sein. Entsprechend wurden ebenfalls Second-Best Maßnahmen diskutiert. Solche **Second-Best Maßnahmen** fokussieren aufgrund der schwierigen globalen Durchsetzbarkeit auf die **europäische bzw. deutsche Ebene**. Dabei ist keineswegs ausgeschlossen, dass von solchen Maßnahmen auch globale Signalwirkungen ausgehen können. Eine Maßnahme auf europäischer bzw. deutscher Ebene kann eine Vorbildwirkung für andere Staaten entfalten.

Als Adressaten der Second-Best Maßnahmen kommen auf der Angebotsseite die Miner und auf der Nachfrageseite die Anlegerinnen in Kryptowerte und Nutzer von Blockchains in Betracht. Anreize spielen eine zentrale Rolle, wenn es darum geht, wie Anlegerinnen und Anleger ihre Investitionen in Kryptowerte auswählen. Bei der Anlage in Kryptowerte werden Anlegerinnen teilweise durch Intermediäre wie Kryptobörsen unterstützt. Daher adressieren einige der diskutierten Maßnahmen Anlegerinnen und Intermediäre gleichermaßen. Änderungen im Nachfrageverhalten der Anlegerinnen und Nutzer können dann mittelbar auch das Angebot durch die Miner beeinflussen.

Die Analyse zeigt, dass **lokale angebotsbezogene Maßnahmen**, bei denen **die Miner** im Fokus stehen, aufgrund der Verlagerungsproblematik eine geringere unmittelbare globale Wirksamkeit aufweisen dürften als nachfragebezogene Maßnahmen. Zwar werden auch durch solche Maßnahmen die lokalen Umweltwirkungen (insbesondere Treibhausgasemissionen) reduziert, jedoch können diese durch substituierende Zuwächse in anderen Regionen ausgeglichen werden. Nur globale Maßnahmen können hier einen signifikanten globalen Effekt bewirken. Diese begrenzte Wirkung zeigt sich sowohl beim ordnungsrechtlichen Verbot des POW-Minings, bei der UVP-Pflicht für Miningfarmen, bei einem Cap-and-Trade-System als auch bei einer Steuer.

Eine größere (globale) Wirksamkeit versprechen **nachfragebezogene Maßnahmen**, wobei bei diesen **die Intermediäre** im Fokus stehen. Eine Verringerung der europäischen Nachfrage führt

zu einer globalen Nachfrageverringering, die vermutlich nicht ohne Weiteres von ausländischen Akteuren kompensiert werden könnte. Daher ist die globale Wirksamkeit dieser Maßnahmen höher einzuschätzen. In diesem Zusammenhang werden im Bericht Verbote, Preismaßnahmen (z.B. Spekulationsfrist, Transaktionssteuer) und informatorische Maßnahmen (z.B. Umweltlabel, Informationskampagne) diskutiert.

Das **Verbot**, Proof-of-Work-Kryptowerte zu besitzen oder zu handeln (ob auf Handelsbörsen oder außerhalb), hätte in Bezug auf Deutschland bzw. die EU potenziell eine hohe Wirksamkeit, da der Zugang stark eingeschränkt würde und somit die Nachfrage in Deutschland bzw. der EU deutlich reduziert würde. Ein solches Verbot wäre zudem theoretisch einfach umzusetzen, da mit der MiCA-VO bereits ein Regulierungsframework für Kryptowerte existiert. Sofern das volkswirtschaftliche Optimum an Proof-of-Work-Mining jedoch größer als null ist, wäre eine solche Lösung aus ökonomischer Sicht ineffizient. Dies liegt daran, dass es nicht den Akteuren überlassen würde, die Umweltwirkungen zu internalisieren und eigenständig nach Lösungen zu suchen.

Alternativ kommen auch lokale marktorientierte oder informatorische Maßnahmen in Betracht. Zu **den marktorientierten Maßnahmen** zählen vor allem Steuern oder ein Cap-and-Trade-System. Bei diesen Maßnahmetypen werden die Externalitäten internalisiert, indem sie mit einer Abgabe belegt werden. Eine Steuer ist hierbei schwieriger umzusetzen, da ex-ante unklar ist, wie stark die Akteure auf die Maßnahme reagieren werden. Bei einer Steuer müsste deshalb ggf. nachjustiert werden, um eine Lenkungswirkung zu erzielen. Einfacher ist es, der Branche eine Obergrenze für Emissionen vorzugeben, was grundsätzlich wiederum einem Cap-and-Trade-System gleichkäme. Offen bleibt hierbei die Frage, wie hoch die Emissionen für Kryptowerte sein dürfen und wie dies mit anderen (Finanz-)Dienstleistungen in Einklang steht.

Nicht zuletzt wurden auch **informatorische Maßnahmen** diskutiert. Auf europäischer Ebene wurde mit der Veröffentlichungspflicht für Informationen über die Umweltwirkung von Kryptowerten im Kryptowerte-Whitepaper nach der MiCA-VO bereits eine solche informatorische Maßnahme ergriffen. Mit dieser Maßnahme können Informationsasymmetrien abgebaut und Transparenz über die Umweltwirkungen einer Anlage in Kryptowerte für die Anleger geschaffen werden. Allerdings scheinen diese Informationen häufig zu komplex zu sein, um bei den Anlegern eine Verhaltensänderung anstoßen zu können. Sie wurden daher vorliegend zu einem Umweltlabel weiterentwickelt. Die Wirksamkeit des Umweltlabels hängt letztlich von der Sensibilität der Anlegenden ab. Nur wenn diese bereit sind, ihr Anlageverhalten zu ändern, kann die Maßnahme eine positive Umweltwirkung entfalten. Die Wirksamkeit ist deshalb mit erheblicher Unsicherheit behaftet. Gegen diese Maßnahmen sprechen die Kosten für die Umsetzung, insbesondere durch die Informationsbeschaffung für die zur Bereitstellung des Labels verpflichteten Akteure, sowie mögliche Missbrauchspotenziale.

Zusammenfassend zeigt sich, dass keine der vorgeschlagenen Maßnahmen, ebenso wenig wie der regulatorische Status quo, den Herausforderungen in Gänze gerecht wird. Letztlich hängt die Beurteilung konkreter Maßnahme immer davon ab, welchem Bewertungskriterium wie viel Gewicht zugesprochen wird. Für die Weiterentwicklung empfehlen wir eine vertiefte Kosten-Nutzen-Analyse der Maßnahmen, die gemäß den Bewertungskriterien besonderes hervorgehoben wurden.

## 7 Quellenverzeichnis

- Ahani, M. (2023, 7. Juli). *What are the implications of the EU Data Act for smart contract operators?* Osborneclarke.com. <https://www.osborneclarke.com/insights/what-are-implications-eu-data-act-smart-contract-operators>
- Allianz Global Investors. (2019). *ESG-Studie von Allianz Global Investors räumt mit veralteten Annahmen auf: Privatanleger wollen nachhaltig investieren und mit ihrer Geldanlage die Welt verbessern.* <https://de.allianzgi.com/-/media/allianzgi/eu/regional-content/sustainable-investing-hub/survey/1530-esg-studie-website-final.pdf>
- Arnauld, A. von. (2022). *Völkerrecht*. (5. Auflage). C.F. Müller.
- Asicminervalue.com. (o.J.). *Miner's efficiency*. <https://www.asicminervalue.com/efficiency/>
- Avan-Nomayo, O. (2021, 02. Juni). *Irish MEP calls for stringent crypto regulations in Europe*. Cointelegraph. <https://cointelegraph.com/news/irish-mep-calls-for-stringent-crypto-regulations-in-europe>
- Bach, I., & Kieninger, E.-M. (2021). Ökologische Analyse des Zivilrechts. *Juristen Zeitung*, 76(22), 1088-1098. <https://doi.org/10.1628/jz-2021-0376>
- Bank for International Settlements. (2022, 15. November). *Project Genesis 1.0: prototype digital platforms for green bond tokenisation*. [https://www.bis.org/about/bisih/topics/green\\_finance/green\\_bonds.htm](https://www.bis.org/about/bisih/topics/green_finance/green_bonds.htm)
- Bastian-Pinto, C. L., de S. Araujo, F. V., Brandão, L. E., & Gomes, L. L. (2021). Hedging renewable energy investments with Bitcoin mining. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, Article 110632. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110520>
- Batten, D. [@DSBatten]. (2023, 03. April). *Bitcoin Mining Emissions Intensity*. [Tweet]. Twitter. <https://twitter.com/DSBatten/status/1642722980324319232/photo/1>
- Baumann, M. (2022, 12. Oktober). *Nachhaltigkeit: Was sind Scope 1-, Scope 2- und Scope 3-Emissionen?* GGX Swiss. <https://ggx.swiss/de/esg/nachhaltigkeit-was-sind-scope-1-scope-2-und-scope-3-emissionen>
- Beaconcha.in. (o.J.). *Staking and hardware*. <https://kb.beaconcha.in/staking-and-hardware>
- Bechtolf, H., & Vogt, N. (2018). Datenschutz in der Blockchain – Eine Frage der Technik. Technologische Hürden und konzeptionelle Chancen. *Zeitschrift für Datenschutz*, 4(1), 66-70.
- Bengtsson, M., Hotta, Y., Hayashi, S., & Akenji, L. (2010). *Policy Tools for Sustainable Materials Management: Applications in Asia*. Institute for Global Environmental Strategies. <http://www.jstor.org/stable/resrep00758>
- Bessler, W., & Kruth, A. (2006). Die Auswirkungen der Spekulationssteuer auf die Verkaufsentscheidungen der Anleger in Deutschland. *Zeitschrift für Bankrecht und Bankwirtschaft*, 18(1), 1-15. <https://doi.org/10.15375/zbb-2006-0101>
- Bevand, M. (2017, 10. März). Electricity consumption of Bitcoin: A market-based and technical analysis. *mrB's blog*. <http://blog.zorinaq.com/bitcoin-electricity-consumption/>
- BDEW. (2017). *Blockchain in der Energiewirtschaft. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft*. [https://www.bdew.de/media/documents/BDEW\\_Blockchain\\_Energiewirtschaft\\_10\\_2017.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/BDEW_Blockchain_Energiewirtschaft_10_2017.pdf)
- Bitcoin.com. (o.J.). *What is the difference between Bitcoin and Ethereum? Learn about crypto and DeFi*. <https://www.bitcoin.com/get-started/difference-between-bitcoin-and-ethereum/>
- Bindseil, U., & Pantelopoulos, G. (2022). Towards the holy grail of cross-border payments. (No. 2693). European Central Bank. <https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/scpwp/ ECB.wp2693~8d4e580438.en.pdf>
- Bitcoin.it. (o.J.). *List of Bitcoin mining ASICs*. [https://en.bitcoin.it/wiki/List\\_of\\_Bitcoin\\_mining\\_ASICs](https://en.bitcoin.it/wiki/List_of_Bitcoin_mining_ASICs)

- Bitmain.com. (2023, 08. September). *S19 Hydro specifications*. <https://support.bitmain.com/hc/en-us/articles/8240690910233-S19-Hydro-Specifications>
- Bitnodes. (o.J.). *Global bitcoin nodes*. <https://bitnodes.io/nodes/all/>
- Blandin, A., Pieters, G., Wu, Y., Eisermann, T., Dek, A., Taylor, S., & Njoki, D. (2020). *3rd global cryptoasset benchmarking study*. Cambridge Centre for Alternative Finance. <https://www.jbs.cam.ac.uk/faculty-research/centres/alternative-finance/publications/3rd-global-cryptoasset-benchmarking-study/>
- Blockchain.com. (o.J.). *Total hash rate (TH/s)*. <https://www.blockchain.com/explorer/charts/hash-rate>
- Blockprint.com (o.J.). *Block fingerprinting for the beacon chain, for client diversity metrics*. Github.com. <https://github.com/sigp/blockprint>
- BMWK. (2023). *Versteigerung von Überschussstrom. Ein präventives Nutzen-statt-Abregeln-Instrument für Wärmelasten und Elektrolyseure (Konzeptpapier)*. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/inputpapier-versteigerung-ueberschussstrom-ag4-27062023.pdf>
- Bogensperger, A., Zeiselmaier, A., & Hinterstocker, M. (2018). *Die Blockchain-Technologie – Chance zur Transformation der Energieversorgung? Berichtsteil Technologiebeschreibung*. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. [https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2017/11/Blockchain\\_Teilbericht\\_Technologiebeschreibung.pdf](https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2017/11/Blockchain_Teilbericht_Technologiebeschreibung.pdf)
- Bogensperger, A., Zeiselmaier, A., Hinterstocker, M., & Dufter, C. (2018). *Die Blockchain-Technologie – Chance zur Transformation der Energiewirtschaft? Berichtsteil Anwendungsfälle*. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. [https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2017/11/Blockchain\\_Teilbericht\\_UseCases.pdf](https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2017/11/Blockchain_Teilbericht_UseCases.pdf)
- Böhme, R., Pesch, P. (2017) Technische Grundlagen und datenschutzrechtliche Fragen der Blockchain-Technologie. *Datenschutz und Datensicherheit – DuD*, 41, 473–481. <https://doi.org/10.1007/s11623-017-0815-y>
- Braegelmann, T., & Kaulartz, M. (2019). Kapitel 1. Einleitung. In T. Braegelmann & M. Kaulartz (Eds.), *Rechtshandbuch Smart Contracts* (1. Auflage., S. 1-12). C.H.Beck.
- Brox, H., & Walker, W. D. (2022). *Allgemeiner Teil des BGB* (46. Auflage). Vahlen. <https://doi.org/10.15358/9783800662982>
- Bruno, A., Weber, P., & Yates, A. J. (2023). Can Bitcoin mining increase renewable electricity capacity? *Resource and Energy Economics*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2023.101376>
- Buczak, A. (2024, 30. Dezember). Is Bitcoin Anonymous? The Myth of Anonymity Debunked. *Ulam Labs*. <https://www.ulam.io/blog/is-cryptocurrency-anonymous>
- Bundesamt für Umwelt, BAFU. (2023). *Methodische Grundlagen von Ökobilanzen*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaft-konsum/fachinformationen/methodische-grundlagen-von-oekobilanzen.html>
- Bundesanstalt für Finanzdienstleistungsaufsicht, BaFin. (2018). *Digitalisierung: Folgen für Finanzmarkt, Aufsicht und Regulierung – Teil I*. <http://www.matressource.de/fileadmin/redakteure/pdf/Vortraege/Berger.pdf>
- Bundesministerium der Finanzen, BMF. (2022). *Einzelfragen zur ertragssteuerlichen Behandlung von virtuellen Währungen und von sonstigen Token*. <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Pressemitteilungen/Finanzpolitik/2022/05/2022-05-09-einzelfragen-zur-ertragsteuerrechtlichen-behandlung-von-virtuellen-waehrungen-und-von-sonstigen-token.html>
- Bundesministerium für Justiz (BMJ); Bundesministerium der Finanzen (BMF). (2022, 29. Juni). *Eckpunkte für ein Zukunftsfinanzierungsgesetz*.

[https://www.bmj.de/SharedDocs/Downloads/DE/Themen/Nav\\_Themen/220629\\_Eckpunkte\\_ZukunftsfinanzierungsG.html](https://www.bmj.de/SharedDocs/Downloads/DE/Themen/Nav_Themen/220629_Eckpunkte_ZukunftsfinanzierungsG.html)

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. (2021). *Die Blockchain-Technologie. Grundlagen, Potenziale und Herausforderungen*.

[https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Digitalisierung/Technologien/Blockchain/Links\\_Dokumente/einfuehrung\\_bc.pdf](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Digitalisierung/Technologien/Blockchain/Links_Dokumente/einfuehrung_bc.pdf)

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. (2023a). *Regelenergie*.

<https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Netzengpassmanagement/Engpassmanagement/Regelenergie/start.html>

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. (2023b). *Netzfrequenz*.

<https://www.smard.de/page/home/wiki-article/446/211042>

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. (o.J.). *Blockchain-Technologie in der öffentlichen Verwaltung*.

[https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Digitalisierung/Technologien/Blockchain/BC\\_oeffentlicheVerwaltung/start.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Digitalisierung/Technologien/Blockchain/BC_oeffentlicheVerwaltung/start.html)

Bundesregierung. (2019). *Blockchain-Strategie der Bundesregierung*. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/publikationen/blockchain-strategie-der-bundesregierung-1672384>

Burgi, M. (2021). Klimaverwaltungsrecht angesichts von BVerfG-Klimabeschluss und European Green Deal. *Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht (NVwZ)*, 40(19), 1401-1408.

Burke, J. J. A. (2021). *Financial services in the twenty-first century. The Present System and Future Developments in Fintech and Financial Innovation*. (1. Auflage). Palgrave Macmillan Cham.

<https://doi.org/10.1007/978-3-030-63967-9>

Busche, J. (2021). § 147 Annahmefrist. In F. J. Säcker, R. Rixecker, H. Oetker, & B. Limperg (Eds.), *Münchener Kommentar zum Bürgerlichen Gesetzbuch: BGB*. (9. Auflage, Band 1). C.H. Beck.

Calì, U., Halden, U., Kuzlu, M., Pasetti, M., Gourisetti, S. N. G., Chandler, S., Rahimi, F., & Lima, C. (2023, 16.-19. Januar). Contribution of Blockchain Technology In Energy to Climate Change Efforts. *2023 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. Washington DC., USA.

Calliess, C. (2023). GG Art. 20a. In G. Dürig, R. Herzog, & R. Scholz (Eds.), *Grundgesetz: 102. Ergänzungslieferung*. C.H. Beck.

Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI). (2024). *Mining equipment list*.

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/15bkGk6cpIGK9DKcytnErBOVZfihPkF1TsAYd4\\_Nac\\_Y/edit#gid=718996821](https://docs.google.com/spreadsheets/d/15bkGk6cpIGK9DKcytnErBOVZfihPkF1TsAYd4_Nac_Y/edit#gid=718996821)

Cambridge Center for Alternative Finance (CCAF). (2023a). *Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI)*. <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci>

Cambridge Center for Alternative Finance (CCAF). (2023b). *Cambridge Blockchain Network Sustainability Index*. <https://ccaf.io/cbnsi/ethereum>

Cambridge Center for Alternative Finance (CCAF). (2023c). *Cambridge Blockchain Network Sustainability Index*. [https://ccaf.io/cbnsi/ethereum/network\\_analytics](https://ccaf.io/cbnsi/ethereum/network_analytics)

Carbon Footprint. (2022). *Country specific electricity grid greenhouse gas emission factors*.

[https://www.carbonfootprint.com/docs/2022\\_01\\_emissions\\_factors\\_sources\\_for\\_2021\\_electricity\\_v10.pdf](https://www.carbonfootprint.com/docs/2022_01_emissions_factors_sources_for_2021_electricity_v10.pdf)

Carbon Footprint (2023a). *International electricity factors*.

[https://www.carbonfootprint.com/international\\_electricity\\_factors.html](https://www.carbonfootprint.com/international_electricity_factors.html)

Carbon Footprint (2023b). *Help and FAQs. For the Online Carbon Calculators.*

<https://www.carbonfootprint.com/calculatorfaqs.html>

Carter, N. (2021, 5. Mai). *How much energy does bitcoin actually consume?* Harvard Business Review.

<https://hbr.org/2021/05/how-much-energy-does-bitcoin-actually-consume>

Casper, M. (2021). § 28 Elektronische Schuldverschreibungen. In F. Möslin & S. Omlor (Eds.), *FinTech-Handbuch*. (2. Auflage, pp. 711-738). C.H. Beck.

Chainbulletin.com (o.J.). *Bitcoin mining map*. <https://chainbulletin.com/bitcoin-mining-map/>

Clientdiversity.org (o.J.). *Client Distribution*. <https://clientdiversity.org/>

Coinmetrics.io (2023a). *Supply*. <https://docs.coinmetrics.io/asset-metrics/supply/isstotusd>

Coinmetrics.io (2023b). *Hash rate*. <https://docs.coinmetrics.io/network-data/network-data-overview/mining/hash-rate>

Coinmetrics.io (2023c). *Fees and revenue*. <https://docs.coinmetrics.io/asset-metrics/fees%20and%20revenue/feetotusd>

Coinshares (2022). *The Bitcoin mining network*.

[https://a.storyblok.com/f/155294/x/0c3f3837c8/coinshares\\_bitcoin\\_mining\\_report\\_jan\\_2022.pdf](https://a.storyblok.com/f/155294/x/0c3f3837c8/coinshares_bitcoin_mining_report_jan_2022.pdf)

Consensys.com (2023). *Blockchain use cases*. <https://consensys.io/blockchain-use-cases>

Coroamă, V. C. (2021). *Blockchain energy consumption: An exploratory study*. Swiss Federal Office of Energy (SFOE). <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=68053&Load=true>

Coroamă, V. C. (2022, 01.-03. Juni). *Exploring the energy consumption of blockchains through an economic threshold approach*. 2021 Joint Conference-11th International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting & 17th International Symposium on the Science and Technology of Lighting (EEDAL/LS: 17), Toulouse, France.

Corusa, A., Erdmann, G., Timofeeva, E., Predel, J. N., Ritschel, F., Sprengel, C. K., Walther, A., Kaufmann, D., Brühl, S., Stocker, V., Rosinger, C., UsLAR, M., & Schäfer-Stradowski, S. (2021). *Digitalisierung in der Energiewirtschaft: Digitalisierung, Daten und Sicherheit: Herausforderungen für Unternehmen in der Energiewirtschaft*. (1. Auflage). Technische Universität Berlin. <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-11849>

Corusa, A., Predel, J., & Schöne, N. (2020). *Eine Marktübersicht der Blockchain in der Energiewirtschaft. Von der Idee zum Geschäftsmodell, von der Technologie zur aktuellen Anwendung*. Technische Universität Berlin. <https://doi.org/10.14279/depositonce-10542.2>

Crypto Carbon Ratings Institute (CCRI) (2022). *The merge – Implications on the electricity consumption and carbon footprint of the Ethereum network*. <https://carbon-ratings.com/dl/eth-report-2022>

Cryptoclimate.org (2023): *Supporters & signatories*. <https://cryptoclimate.org/supporters/>

Culotta, C., Brüning, S., Schulte, A., Nuissl, G., Märkel, C., & Beck, R. (2022). *Nachhaltigkeit im Kontext der Blockchain-Technologie – Anwendungsbeispiele, Herausforderungen und Handlungsfelder*. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/blockchain-nachhaltigkeit.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/blockchain-nachhaltigkeit.pdf?__blob=publicationFile&v=4)

Datacommons.org. (o.J.). *Germany – Energy generation*.

[https://datacommons.org/explore/#t=dc%2Ftopic%2Fenergy\\_generation&p=country%2FDEU](https://datacommons.org/explore/#t=dc%2Ftopic%2Fenergy_generation&p=country%2FDEU)

Demuth, B., & Jena, O. (2016). *Devisenbesteuerung aus Sicht strafbefreiender Selbstanzeigen*. In *Deutsches Steuerrecht (DStR)*. (S. 204-209). C.H.Beck.

- Deutsche Börse Group. (2022). *Annual Report 2022*. <https://www.deutsche-boerse.com/resource/blob/3373890/1cdeb942b1a02ce3495e25240dfdf81/data/DBG-Detailed-GRI-index-Deutsche-Bo%CC%88rse-Group-AR-2022.pdf>
- De Vries, A. (2019). 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., & Stoll, C. (2021). Bitcoin’s growing e-waste problem. *Resources, Conservation and Recycling*, 175, 10.1016/j.resconrec.2021.105901
- De Vries, A., Stoll, C., Klaassen, L., & Gallersdörfer, U. (2022). Revisiting Bitcoin’s carbon footprint. *Joule*, 6(3), 498-502. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.02.005>
- De Vries, A. (2023). Cryptocurrencies on the road to sustainability: Ethereum paving the way for Bitcoin. *Patterns*, 4(1). <https://doi.org/10.1016/j.patter.2022.100633>
- Dick, C. I., & Praktijnjo, A. (2019). Blockchain technology and electricity wholesale markets: Expert insights on potentials and challenges for OTC trading in Europe. *Energies*, 12(5), 832. <https://doi.org/10.3390/en12050832>
- Dionysopoulos, L., Giaglis, G., Ntouzougou, A., & Charalambous, M. (2022). POW energy consumption in the EU. *EU Blockchain Observatory Forum*. [https://blockchain-observatory.ec.europa.eu/publications/pow-energy-consumption-eu\\_en](https://blockchain-observatory.ec.europa.eu/publications/pow-energy-consumption-eu_en)
- Drăgnoiu, A.-E., Platt, M., Wang, Z., & Zhou, Z. (2023, 18.-21. Juli). The more you know: Energy Labelling Enables More Sustainable Cryptocurrency Investments. *Proceedings of the 2023 IEEE 43rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW)*, Hong Kong, China.
- Ecochain. (2024, 18. Juni). Life Cycle Assessment (LCA) – Everything you need to know. *Ecochain*. <https://ecochain.com/blog/life-cycle-assessment-lca-guide/>
- Eco Energy Geek. (2022). *Raspberry Pi Power Consumption Guide*. <https://www.ecoenergygeek.com/raspberry-pi-power-consumption/>
- Einsele, D. (2021). § 130 Wirksamwerden der Willenserklärung gegenüber Abwesenden. In F. J. Säcker, R. Rixecker, H. Oetker, & B. Limperg (Eds.), *Münchener Kommentar zum Bürgerlichen Gesetzbuch: BGB*. (9. Auflage, Band. 1, S. 204-209). C.H.Beck.
- Epiney, A. (2018). Artikel 20a. In P. M. Huber & A. Vosskuhle (Eds.), *Grundgesetz: GG* (7. Auflage., Band. 2). C.H.Beck.
- Ethereum.org. (2023a). *Consensus clients*. <https://ethereum.org/en/developers/docs/nodes-and-clients/#consensus-clients>
- Ethereum.org. (2023b). *Gas und Gebühren*. <https://ethereum.org/de/developers/docs/gas/>
- Ethernodes.org. (o.J.). *Ethereum mainnet statistics*. <https://ethernodes.org/>
- European Commission. (2021). *Annex to the Commission implementing decision on the financing of the Digital Europe Programme and adoption of the multiannual work programme – European Digital Innovation Hubs for 2021-2023*. [https://ec.europa.eu/newsroom/repository/document/2021-45/C\\_2021\\_7911\\_1\\_EN\\_annexe\\_acte\\_autonome\\_cp\\_part1\\_v2\\_d4ygl3fB7OJrEhLGIXBaC5w0X0\\_80907.pdf](https://ec.europa.eu/newsroom/repository/document/2021-45/C_2021_7911_1_EN_annexe_acte_autonome_cp_part1_v2_d4ygl3fB7OJrEhLGIXBaC5w0X0_80907.pdf)
- European Central Bank. (2021, 14. Juli). *Bitcoin – Was ist das?* <https://www.ecb.europa.eu/ecb-and-you/explainers/tell-me/html/what-is-bitcoin.de.html>
- European Commission. (2023a). *Annex to the Commission implementing decision on the financing of the Digital Europe programme and the adoption of the work programme for 2023-2024 and amending the Commission Implementing Decision C(2021) 7914 on the adoption of the multiannual work programme for 2021-2022*. <https://ec.europa.eu/newsroom/dae/redirection/document/94609>

- European Commission. (2023b). Blockchain-Standards. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/policies/blockchain-standards>
- European Commission. (2025). *Carbon Border Adjustment Mechanism*. [https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism\\_de](https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_de)
- Fanta, A. (2022, 21. April). EU tüfelt an Bitcoin-Verbot. *Netzpolitik.org*. <https://netzpolitik.org/2022/interne-dokumente-eu-tueftelt-an-bitcoin-verbot/>
- Figura, J. (2023). § 1 Begriffsbestimmungen. In F. Herzog (Ed.), *Geldwäschegesetz: GwG* (5. Auflage., S. 1-10). C.H.Beck.
- Filatovas, E., Marcozzi, M., Mostarda, L., & Paulavičius, R. (2022). A MCDM-based framework for blockchain consensus protocol selection. *Expert Systems with Applications*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117609>
- Finck, M. (2018). Blockchains and data protection in the European Union. *European Data Protection Law Review*, 4(1), 17-35. <https://doi.org/10.21552/edpl/2018/1/6>
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., & Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- Fischermann, T. (2024, 3.Januar). "Das sind rationale Leute": Interview mit Koray Caliskan. *Die Zeit*. <https://www.zeit.de/2024/02/kryptowaehrungen-bitcoin-kurs-blockchain-investition>
- Franchina, L., & Carlomagno, G. (2020). A Comparison Between SWIFT and Blockchain from a Cyber Resiliency Perspective. In: Nadjm-Tehrani, S. (eds) *Critical Information Infrastructures Security*. CRITIS 2019. *Lecture Notes in Computer Science()*, vol 11777. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37670-3\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37670-3_12)
- Fridgen, G., Körner, M.-F., Walters, S., & Weibelzahl, M. (2021). Not All Doom and Gloom: How Energy-Intensive and Temporally Flexible Data Center Applications May Actually Promote Renewable Energy Sources. *Business & Information Systems Engineering*, 63(4), 243-256. <https://doi.org/10.1007/s12599-021-00686-z>
- Fries, M. (2019). Schadensersatz ex machina. *Neue Juristische Wochenschrift*, 13, 901-905.
- Fries, M. (2021). § 9 Smart contracts. In F. Möslin & S. Omlor (Eds.), *FinTech-Handbuch* (2. Auflage., S. 194-206). C.H.Beck.
- Fromberger, M., & Zimmermann, P. (2021). § 1 Technische und rechtstatsächliche Grundlage. In P. Maume & L. Maute (Eds.), *Rechtshandbuch Kryptowerte: Blockchain, Tokenisierung, Initial Coin Offerings* (1. Auflage). C.H.Beck.
- Führ, M., Dopfer, J., & Bizer, K. (2009). Evaluation des UVPG des Bundes – Ergebnisse einer retrospektiven Gesetzesfolgenforschung. *Zeitschrift für Umweltrecht*, 2, 59-65.
- Fulterer, R., & Da Silva, G. (2021, 24. September). China verbietet Transaktionen mit Bitcoin und anderen Kryptowährungen. *Neue Zürcher Zeitung*. <https://www.nzz.ch/technologie/china-verbietet-transaktionen-mit-bitcoin-und-anderen-kryptowaehrungen-ld.1647154?reduced=true>
- Funke, M., Meyer, J., Trebesch, C. (2020): Der deutsch-französische Vorschlag zu einer EU-Finanztransaktionssteuer: Internationale Einordnung und Politikempfehlungen, *Kieler Beiträge zur Wirtschaftspolitik*, 24, Institut für Weltwirtschaft (IfW), Kiel.
- Gallersdörfer, U., Klaassen, L., & Stoll, C. (2020). Energy Consumption of Cryptocurrencies Beyond Bitcoin. *Joule*, 4(9), 1843-1846. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.07.013>
- Ganesan, J. (2022). Cryptocurrency Investment Report. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19237.06882>

- Gatteschi, V., Lamberti, F., Demartini, C., Pranteda, C., & Santamaría, V. (2018). Blockchain and Smart Contracts for Insurance: Is the Technology Mature Enough? *Future Internet*, 10(2), 20.  
<https://doi.org/10.3390/fi10020020>
- Gawel, E., Köck, W., Kern, K., Möckel, S., Holländer, R., Fälsch, M., & Völkner, T. (2011). *Weiterentwicklung von Abwasserabgabe und Wasserentnahmeentgelten zu einer umfassenden Wassernutzungsabgabe (67/2011)*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/weiterentwicklung-von-abwasserabgabe>
- Giri, G., Nivedhitha, K. S., & Manohar, H. L. (2024). Can blockchain enabled green bond issuance lead to intent to invest? A moderated mediation model. *Applied Economics*, 56(18), 2191-2208.  
<https://doi.org/10.1080/00036846.2023.2186360>
- Glassnode. (o.J.). ETH: *Miners and Gas Price*. <https://studio.glassnode.com/dashboards/eth-miners-and-gas-price?a=ETH>
- Gola, P. (2022). Art. 4 Begriffsbestimmungen. In P. Gola & D. Heckmann (Eds.), *Datenschutz-Grundverordnung/Bundesdatenschutzgesetz: DS-GVO / BDSG* (3. Auflage). C.H.Beck.
- Gomille, C. (2022). § 130 Wirksamwerden der Willenserklärung gegenüber Abwesenden. In J. Hager (Ed.), *Beck'sche Online Großkommentar BGB*. C.H.Beck.
- Gröger, J., Liu, R., Stobbe, L., Druschke, J., & Richter, N. (2021). *Green cloud computing: Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing (94/2021)*. Umweltbundesamt.  
<https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/green-cloud-computing>
- Grothe, H. (2021). § 229 Selbsthilfe. In F. J. Säcker, R. Rixecker, H. Oetker, & B. Limperg (Eds.), *Münchener Kommentar zum Bürgerlichen Gesetzbuch* (9. Auflage, Band 1.). C.H.Beck.
- Gschnaidtner, C. (2021). § 2 Ökonomik von Kryptotoken. In P. Maume & L. Maute (Eds.), *Rechtshandbuch Kryptowerte: Blockchain, Tokenisierung, Initial Coin Offerings* (1. Auflage). C.H.Beck.
- Haber, S., & Stornetta, W. S. (1991). How to time-stamp a digital document. *Journal of Cryptology*, 4(2), 99-111.  
<https://doi.org/10.1007/BF00196791>
- Hacker, P. (2020). *Datenprivatrecht: Neue Technologien im Spannungsfeld von Datenschutzrecht und BGB* (1. Auflage). Mohr Siebeck.
- Hafner, M., & Jaag, C. (2023). Blockchain und ihre Anwendungen. *zsis - Zentrum für Schweizerisches und Internationales Steuerrecht*, 2023(2), 41-53.
- Heckelmann, M. (2018). Zulässigkeit und Handhabung von Smart Contracts. *Neue Juristische Wochenschrift*, 18, 504-510.
- Helmy, K., Nuzzi, L., Mead, A., & Waters, K. (2023). The signal & the nonce. Tracing ASIC fingerprints to reshape our understanding of Bitcoin mining. *CoinMetrics*. <https://coinmetrics.io/special-insights/bitcoin-nonce-analysis/>
- Heuel, I., & Matthey, I. (2018). Steuerliche Behandlung von Kryptowährungen im Privatvermögen: Wann müssen Bitcoin-Gewinne versteuert werden? *NWB – Steuer- und Wirtschaftsrecht*, 18, 1037-1055.
- Hilty, L., Lohmann, W., Behrendt, S., Evers-Wölk, M., Fichter, K., & Hintemann, R. (2015). *Green software: Analysis of potentials for optimizing software development and deployment for resource conservation (23/2015)*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/green-software>
- Himmer, K., & Binder, S. (2022). Das BMF-Schreiben zur ertragssteuerlichen Behandlung von virtuellen Währungen und sonstigen Token. *Die Unternehmensbesteuerung*, 6, 273-277.

- Hirzle, K., & Hugendubel, J. (2022). Die Entwicklung des Kryptorechts im Jahr 2022. *Zeitschrift für Bank- und Kapitalmarktrecht*, 2, 821-833. C.H.Beck
- Holl, B. (2023, 5. Juli). Droht ein Bitcoin-Verbot in Europa? *CMS Hasche Sigle*. <https://www.cmshs-bloggt.de/rechtsthemen/energy-goes-digital/droht-ein-bitcoin-verbot-in-europa/>
- Hoppmann, D. (2024, 16. Februar). Die Grünen wollen die Krypto-Jahreshaltefrist abschaffen. *BTC-ECHO*. <https://www.btc-echo.de/news/die-gruenen-wollen-die-krypto-jahreshaltefrist-abschaffen-cv-178744/>
- Ibañez, J. I., & Freier, A. (2023). Bitcoin's Carbon Footprint Revisited: Proof of Work Mining for Renewable Energy Expansion. *Challenges*. 2023; 14(3), <https://doi.org/10.3390/challe14030035>
- Ibañez, J. I., & Rua, F. (2023). The Energy Consumption of Proof-of-Stake Systems: Replication and Expansion [S.l.]: SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4324137>
- International Energy Agency (IEA). (2023a). *Gas flaring*. <https://www.iea.org/energy-system/fossil-fuels/gas-flaring>
- International Energy Agency (IEA). (2023b). *Emissions factors*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/emissions-factors-2#emissions-factors>
- International Energy Agency (IEA). (2023c). Life cycle upstream emission factors 2023 (pilot edition). *International Energy Agency*. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/69b838f4-12ad-4f51-9155-9da6435b5d53/IEA\\_UpstreamLifeCycleEmissionFactors\\_Documentation.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/69b838f4-12ad-4f51-9155-9da6435b5d53/IEA_UpstreamLifeCycleEmissionFactors_Documentation.pdf)
- International Energy Agency (IEA). (2023d). *Data Centres and Data Transmission Networks*. <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks>
- International Energy Agency (IEA). (2024). Electricity 2024: Analysis and forecast. *International Energy Agency*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/6b2fd954-2017-408e-bf08-952fdd62118a/Electricity2024-Analysisandforecastto2026.pdf>
- Janicki, T., & Saive, D. (2019). Privacy by design in blockchain-networks: Verantwortlichkeit und datenschutzkonforme Ausgestaltung von Blockchains. *Zeitschrift für Datenschutz*, 19, 251-256.
- Jones, K. L. (2022, 10. August). Crypto mining can retire fossil fuels for good. Here's how. *World Economic Forum*. <https://www.weforum.org/agenda/2022/08/cleaning-up-cryptocurrency-mining/>
- Kahl, W. (2018). Art. 11 Beachtung der Erfordernisse des Umweltschutzes. In R. Streinz (Ed.), *EUV/AEUV* (3. Auflage). C.H.Beck.
- Kaiser, J. (1987). Der Geltungsanspruch des Rechts in einer freiheitlichen Industriegesellschaft. In P. Badura & J. Kaiser (Eds.), *Parlamentarische Gesetzgebung und Geltungsanspruch des Rechts* (1. Auflage, S. 39-62). Wirtschaftsverlag J. P. Bachem.
- Kamann, H.-G., & Braun, M. (2018). Art. 16 Recht auf Berichtigung. In E. Ehmann & M. Selmayr (Eds.), *Datenschutz-Grundverordnung* (2. Auflage). C.H.Beck
- Kämmerer, A. (2021). Art. 12 GG Berufsfreiheit. In I. v. Münch & P. Kunig (Eds.), *Grundgesetz-Kommentar: GG* (7. Auflage.). C. H. Beck.
- Kamp, M. (2023). Krypto-Verbot in China: Die Handelsplattform Binance verzeichnet trotzdem Rekordumsätze. *Neue Zürcher Zeitung*. <https://www.nzz.ch/wirtschaft/krypto-verbot-china-die-handelsplattform-binance-verzeichnet-trotzdem-rekord-umsaetze-ld.1749787>
- Kaulartz, M., & Heckmann, J. (2016). Smart contracts – Anwendungen der Blockchain-Technologie. *Computer und Recht*, 9, 618-624. <https://doi.org/10.9785/cr-2016-0923>
- Kaulartz, M. (2021). § 5 Blockchain-Technologien. In F. Möslein & S. Omlor (Eds.), *FinTech-Handbuch* (2. Auflage, S. 93-114). C.H.Beck.

- Kischel, U. (2023). Art. 3 [Gleichheit vor dem Gesetz]. In V. Epping & C. Hillgruber (Eds.), *Beck'scher Online Kommentar zum Grundgesetz*. C.H.Beck.
- Klabunde, A. (2018). Art. 4 DS-GVO Begriffsbestimmungen. In F. Möslein & S. Omlor (Eds.), *FinTech-Handbuch* (2. Auflage.). C.H. Beck.
- Klimawahl.ch. (2023). *Schweizer Strommix im Vergleich*. <https://klimawahl.ch/wp-content/uploads/2019/05/Strommix-V2.pdf>
- Kment, M. (2012). Einleitung. In W. Hoppe & M. Beckmann (Eds.), *Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG): Kommentar* (4. Auflage). Carl Heymanns Verlag.
- Koch, J., & Reitwiessner, C. (2019). Kapitel 5. Technische Interpretation von Smart Contracts. In T. Braegelmann & M. Kaulartz (Eds.), *Rechtshandbuch Smart Contracts* (1. Auflage., S. 59-66). C.H. Beck.
- Köhler, S., & Pizzol, M. (2019a). Life Cycle Assessment of Bitcoin Mining. *Environmental Science & Technology*, 53(23), <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05687>
- Köhler, S., & Pizzol, M. (2019b). Life Cycle Assessment of Bitcoin Mining: Supporting information. *Environmental Science & Technology*, 53(23), <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05687>
- Kollmann, J. (2021). § 17 Ertragssteuerliche Behandlung von Kryptotoken. In P. Maume & L. Maute (Eds.), *Rechtshandbuch Kryptowerte: Blockchain, Tokenisierung, Initial Coin Offerings* (1. Auflage). C.H. Beck.
- KPMG. (2023). *Bitcoin's role in the ESG imperative*. <https://advisory.kpmg.us/articles/2023/bitcoin-role-esg-imperative.html>
- Krappel, T. (2024). Energieaudit, Energiemanagement und Umweltmanagement. Neue sektorübergreifende Anforderungen durch Energieeffizienzgesetz (EnEfG) und Energieeffizienzrichtlinie (EED). *Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht*, 449-457.
- Krause, M. J., & Tolaymat, T. (2018). Quantification of energy and carbon costs for mining cryptocurrencies. *Nature Sustainability*, 1, 711–718. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0152-7>
- Krempl, S. (2022, 19. Oktober). EU-Kommission arbeitet an Energieeffizienz-Label für Bitcoin, Computer & Co. *Heise Online*. <https://www.heise.de/news/EU-Kommission-arbeitet-an-Energieeffizienz-Label-fuer-Bitcoin-Computer-Co-7313645.html>
- Krupar, F., & Strassemeyer, L. (2018). Distributed Ledger Technologien und Datenschutz: Widerspruch oder Evolution?, *Kommunikation und Recht*, 9, 746-753.
- Lehmann, M. (2020). Zeitenwende im Wertpapierrecht: Der Referentenentwurf für ein Gesetz über elektronische Wertpapiere (eWpG). *Zeitschrift für Bank- und Kapitalmarktrecht*, 20(9), 431-438.
- Lohmar, O., & Jeuckens, J. (2022). "To the Moon", aber abzüglich Steuern? Die ertragssteuerliche Behandlung von virtuellen Währungen (Teil I). Zugleich kritische Analyse des BMF-Schreibens v. 10.5.2022. *Deutsches Steuerrecht*, 37, 1833-1840.
- Lucas, A., Geneiatakis, D., Soupionis, Y., Nai-Fovino, I., & Kotsakis, E. (2021). Blockchain Technology Applied to Energy Demand Response Service Tracking and Data Sharing. *Energies*, 14(7), <https://doi.org/10.3390/en14071881>
- MacKenzie, S.; Smith, J. (2023). *Texas paid bitcoin miner Riot \$31.7 million to shut down during heat wave in August*. CNBC. <https://www.cnbc.com/2023/09/06/texas-paid-bitcoin-miner-riot-31point7-million-to-shut-down-in-august.html>
- Martini, M., & Weinzierl, Q. (2017). Die Blockchain-Technologie und das Recht auf Vergessenwerden: zum Dilemma zwischen Nicht-Vergessen-Können und Vergessen-Müssen. *Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht*, 36(8), 1251-1259.

- Martini, M. (2021). DS-GVO Art. 21 Widerspruchsrecht. In B. Paal & D. Pauly (Eds.), *Datenschutz-Grundverordnung, Bundesdatenschutzgesetz: DS-GVO BDSG* (3.Auflage). C.H.Beck.
- Matthes, F. (2019). Kapitel 4 Smart Contracts: Eine Standortbestimmung aus Sicht der Informatik. In T. Braegelmann & M. Kaulartz (Eds.), *Rechtshandbuch Smart Contracts* (1. Auflage). C.H.Beck.
- Maume, P., & Haffke, L. (2021). § 15 Geldwäsche-Compliance. In P. Maume & L. Maute (Eds.), *Rechtshandbuch Kryptowerte: Blockchain, Tokenisierung, Initial Coin Offerings* (1.Auflage). C.H.Beck.
- Maume, P., & Siadat, A. (2023). Struktur, Definition und Anwendungsfälle der Kryptoregulierung. *Neue Juristische Wochenschrift*, 17, 116-1173. C.H.Beck.
- Minerstat.com. (o.J.). *ASIC Miners. Best ASIC miners by profitability and hashrates*.  
<https://minerstat.com/hardware/asics>
- Mirzayi, S., & Mehrzad, M. (2017,26.-27. Oktober). *Bitcoin, an SWOT analysis* [Konferenzbeitrag]. 2017 7th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE), Mashhad, Iran.
- Mittwoch, A.-C. (2024). Der digitale Produktpass der Ökodesign-Verordnung: Passierschein zur erfolgreichen Zwillingstransformation im Produktrecht? *Recht Digital*, 4(2), 62-68.
- Monitoreth.io. (o.J.). *Ethereum Nodes. Consensus Layer*. <https://monitoreth.io/nodes>
- Möslein, F. (2018). § 147 Annahmefrist. In J. Hager (Ed.), *Beck'sche Online Grosskommentar BGB*. C.H.Beck.
- Möslein, F. (2019). Smart Contracts im Zivil- und Handelsrecht. *Zeitschrift für das gesamte Handelsrecht und Wirtschaftsrecht*, 183(2), 254-293.
- Möslein, F. (2019a). Rechtsgeschäftslehre und Smart Contracts. In T. Braegelmann & M. Kaulartz (Eds.), *Rechtshandbuch Smart Contracts* (1. Auflage., S. 81-98). C.H. Beck.
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- Natarajan, H., Krause, S., & Gradstein, H. (2017). *Distributed Ledger Technology (DLT) and Blockchain*. World Bank Group. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/177911513714062215/pdf/122140-WP-PUBLIC-Distributed-Ledger-Technology-and-Blockchain-Fintech-Notes.pdf>
- National Renewable Energy Laboratory. (2021). *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation: Update*. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/80580.pdf>
- Nettesheim, M. (2023). AEUV Art. 288 Rechtsakte; Katalog. In E. Grabitz, M. Hilf, & M. Nettesheim (Eds.), *Das Recht der Europäischen Union: EUV/AEUV* (80. Auflage). C.H. Beck.
- Neumüller, A. (2023, 31. August). Bitcoin electricity consumption: an improved assessment. *University of Cambridge*. <https://www.jbs.cam.ac.uk/2023/bitcoin-electricity-consumption/>
- Niaz, H., Shams, M. H., Liu, J. J., & You, F. (2022). Mining Bitcoins with carbon capture and renewable energy for carbon neutrality across states in the USA. *Energy & Environmental Science*, 9, 3551-3570.  
<https://doi.org/10.1039/D1EE03804D>
- Niranjnamurthy, M., Nithya, B. N., & Jagannatha, S. (2018). Analysis of Blockchain technology: Pros, Cons and SWOT. *Cluster Computing*, 22, 14743–14757. <https://doi.org/10.1007/s10586-018-2387-5>
- OECD. (2003). *Voluntary Approaches for Environmental Policy: Effectiveness, Efficiency and Usage in Policy Mixes*, (1. Auflage, OECD Publishing, Paris). <https://doi.org/10.1787/9789264101784-en>
- Omlor, S. (2024). Privatrecht der Kryptowerte. *Neue Juristische Wochenschrift*, 335-341.
- Oster, J. (2021). Internationale Zuständigkeit und anwendbares Recht im Datenschutz. *Zeitschrift für Europäisches Privatrecht*, 2, 275-306.

- OSTP. (2022). *Climate and Energy Implications of Crypto-Assets in the United States*.  
<https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/09/09-2022-Crypto-Assets-and-Climate-Report.pdf>
- Oswald, B. (2022, 22. April). Bitcoin-Verbot in der EU – Doch nicht vom Tisch? *Bayerischer Rundfunk*.  
<https://www.br.de/nachrichten/netzwelt/bitcoin-verbot-in-der-eu-doch-nicht-vom-tisch,T3k8Xgq>
- Overkamp, P., & Schings, C. (2019). Blockchain im Strom- und Verkehrssektor. Potenziale und rechtliche Herausforderungen. *Zeitschrift für das gesamte Recht der Energiewirtschaft*, 3-8.
- Paal, B., & Pauly, D. (2021). Vorbemerkung Art. 1. In B. Paal & D. Pauly (Eds.), *Beck'sche Kompakt-Kommentare Datenschutz-Grundverordnung und Bundesdatenschutzgesetz* (3. Auflage). C.H.Beck.
- Papageorgiou, O., Sedlmeir, J., Fridgen, G., Vlachos, I., Kostopoulos, N., Damvakeraki, T., Noszek, Z., Papoutsoglou, I., Anania, A., Belotti, M., Arribas, I., Cathcart, W., & Slapnik, T. (2021). *Energy Efficiency of Blockchain Technologies*. Brussels, Belgium: European Union Blockchain Observatory & Forum.  
<https://orbilu.uni.lu/handle/10993/49463>
- Paulus, D. (2020). Was ist eigentlich... ein Smart Contract? *Juristische Schulung*, 2, 107-108.
- Paulus, D., & Matzke, P. (2018). Smart Contracts und das BGB – Viel Lärm um nichts? *Zeitschrift für die gesamte Privatrechtswissenschaft*, 4, 431–465.
- PayPal. (2022). *Global impact report 2022*.  
[https://s202.q4cdn.com/805890769/files/doc\\_downloads/2023/05/2022-Global-Impact-Report\\_FINAL-73.pdf](https://s202.q4cdn.com/805890769/files/doc_downloads/2023/05/2022-Global-Impact-Report_FINAL-73.pdf)
- Pesch, P., & Böhme, R. (2017). Datenschutz trotz öffentlicher Blockchain? Chancen und Risiken bei der Verfolgung und Prävention Bitcoin-bezogener Straftaten. *Datenschutz und Datensicherheit-DuD*, 41(2), 93–98.
- Pesch, P. (2019). Blockchain, smart contracts und Datenschutz: Risiken und Grenzen Blockchain-basierter Smart Contracts. In M. Fries & B. Paal (Eds.), *Smart Contracts*. Mohr Siebeck.
- Posey, B., & Gillis, A. S. (2024). Server Degradation (Verschleiss). *Computerweekly.de*.  
<https://www.computerweekly.com/de/definition/Server-Degradation-Verschleiss>
- Platt, M., Sedlmeir, J., Platt, D., Xu, J., Tasca, P., Vadgama, N., & Ibañez, J. I. (2021). The energy footprint of blockchain consensus mechanisms beyond proof-of-work. *2021 IEEE 21st International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C), Hainan, China*.
- PWC. (2022, 19. Dezember). *Global crypto regulation report 2023*. <https://www.pwc.com/gx/en/new-ventures/cryptocurrency-assets/pwc-global-crypto-regulation-report-2023.pdf>
- Quartierstrom. (o.J.). *Switzerland's first local electricity market. A lighthouse project funded by the Swiss Federal Office of Energy paves the way for the future electricity supply*. <https://quartierstrom.ch/index.php/en/homepage/>
- Quiel, P. (2018). Blockchain-Technologie im Fokus von Art. 8 GRC und DS-GVO: Ein Zwiespalt zwischen Innovation und unialem Datenschutzrecht? *Datenschutz und Datensicherheit - DuD*, 42, 566–573.  
<https://doi.org/10.1007/s11623-018-1000-7>
- Raffaele, D., Bolwerk, V. (2023, 08. Oktober). Peer to peer energy trading. Accelerating the energy transition and capturing business value with AI and data. *Deloitte*. <https://www2.deloitte.com/nl/nl/pages/energy-resources-industrials/articles/peer-to-peer-energy-trading.html>
- 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. Kurzstudie im Rahmen des Vorhabens „Umwelt und Digitalisierung“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)*. Wuppertal Institut. <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7815/file/WR21.pdf>

- Raskin, M. (2017). The law and legality of smart contracts. *Georgetown Law Technology Review*, 304, 305–341. <http://doi.org/10.2139/ssrn.2842258>
- Redaktion CVJ.ch. (2022, 30. Januar). *Bitcoin-Energieverbrauch: Mythos oder Fakt?* Crypto Valley Journal. <https://cvj.ch/fokus/hintergrund/energieverbrauch-des-bitcoin-netzwerks-mythos-oder-fakt/>
- Reimer, E. (2021). Territorialitätsprinzip. In G. Dürig, R. Herzog, & R. Scholz (Eds.), *Staatslexikon* (8. Auflage). Herder Verlag.
- Remmert, B. (2024). Art. 12 GG Berufsfreiheit. In G. Dürig, R. Herzog, & R. Scholz (Eds.), *Grundgesetz* (103. Auflage). C.H. Beck.
- Rennig, C. (2020). KWG goes Krypto. Die Aufnahme von Kryptowerten und des Kryptoverwahrgeschäfts in das KWG. *Zeitschrift für Bank- und Kapitalmarktrecht*, 23–29.
- Riehm, T. (2019). Kap. 9 Smart Contracts und AGB-Recht. In T. Braegelmann & M. Kaulartz (Eds.), *Rechtshandbuch Smart Contracts* (S. 99–112). C.H.Beck.
- Riehm, T. (2019a). Smart Contracts und verbotene Eigenmacht. In M. Fries & B. Paal (Eds.), *Smart Contracts* (S. 85 ff.). Mohr Siebeck.
- Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (o.J.). Energy. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/energy>
- Roland Berger. (2022, 4. April). *How crypto mining will transform the energy industry*. <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/How-crypto-mining-will-transform-the-energy-industry.html>
- Romba, E., Oppenheim, R., & Pfaf, L. Pilotregelung für DLT-Marktinfrastrukturen. Analyse des Regulatory Sandbox-Ansatzes für den Handel mit DLT-basierten Wertpapieren. *Recht Digital*, 2023, 145 ff.
- Rossnagel, A. (2018). Pseudonymisierung personenbezogener Daten. Ein zentrales Instrument im Datenschutz nach der DS-GVO. *Zeitschrift für Datenschutz*, 8(6), 2018, 243-247.
- Rühl, G. (2019). Kapitel 12. Smart Contracts und anwendbares Recht. In T. Braegelmann & M. Kaulartz (Eds.), *Rechtshandbuch Smart Contracts* (S. 147–168). C.H. Beck.
- Nakamoto, S. (2008). *Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system*. [https://www.coinpro.ch/wp-content/uploads/2018/10/Whitepaper\\_bitcoin.pdf](https://www.coinpro.ch/wp-content/uploads/2018/10/Whitepaper_bitcoin.pdf)
- Sachverständigenrat für Umweltfragen. (1994). *Umweltgutachten 1994 - Für eine dauerhaft-umweltgerechte Entwicklung*. [https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01\\_Umweltgutachten/1994\\_2000/1994\\_Umweltgutachten\\_Bundestagsdrucksache.html](https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/1994_2000/1994_Umweltgutachten_Bundestagsdrucksache.html)
- Savelyev, A. (2017). Contract law 2.0: ‘Smart’ Contracts As the Beginning of the End of Classic Contract Law. *Information & Communications Technology Law*, 26(2), 116-134. <http://dx.doi.org/10.1080/13600834.2017.1301036>
- Säcker, F. J. (2021). Einleitung. In F. J. Säcker, R. Rixecker, H. Oetker, & B. Limperg (Eds.), *Münchener Kommentar zum Bürgerlichen Gesetzbuch* (9. Auflage, S. 1-30). C.H.Beck.
- Sacksofsky, U. (2022). § 39 Anreize. In A. Vosskuhle, M. Eifert, & C. Möllers (Eds.), *Grundlagen des Verwaltungsrechts* (3. Auflage, Band. 2, S. 177-189). C.H.Beck
- Schäfer, F. (2023). § 858 Verbotene Eigenmacht. In F. J. Säcker, R. Rixecker, H. Oetker, & B. Limperg (Eds.), *Münchener Kommentar zum Bürgerlichen Gesetzbuch* (9. Auflage., S. 852-860). C.H.Beck.
- Schäfer, F. A. (2023). § 1 Begriffsbestimmungen. In R. Fischer & H. Schulte-Mattler (Eds.), *Kreditwesengesetz, VO (EU) Nr. 575/2013 (CRR) mit Ausführungsvorschriften* (6. Auflage., S. 1-15). C.H.Beck.

- Schild, H. (2023). Art. 4 DS-GVO Begriffsbestimmungen. In H. Wolff & S. Brink (Eds.), *Beck'scher Onlinekommentar Datenschutzrecht* (S. 1-30). C.H.Beck.
- Schlacke, S., Tonner, K., Gawel, E., Alt, M., & Bretschneider, W. (2015). *Stärkung eines nachhaltigen Konsums im Bereich der Produktnutzung durch Anpassung im Zivil- und öffentlichen Recht (72/2015)*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/staerkung-eines-nachhaltigen-konsums-im-bereich>
- Schlumberger, J.-A. F., Noro, P., Zähringer, L. (2022). *Blockchains & Sustainable Development*. Bockchain for Good. [https://blockchainforgood.fr/wp-content/uploads/2023/01/Rapport-2022-ok\\_ENG-V3.pdf](https://blockchainforgood.fr/wp-content/uploads/2023/01/Rapport-2022-ok_ENG-V3.pdf)
- Schmalenberg, A. (2022). Smart Contracts – der “Datentransfermechanismus” des Data Act. *Zeitschrift für das Recht der digitalen Wirtschaft*, 10, 361-362.
- Schmid, D. (2021). § 16 Datenschutz. In P. Maume & L. Maute (Eds.), *Rechtshandbuch Kryptowerte. Blockchain, Tokenisierung, Initial Coin Offerings* (S. 135-150). C.H.Beck.
- Schneider, S. (2009). Verfassungsrechtliche Grundlagen und Grenzen des objektiven Nettoprinzips. *Deutsches Steuerrecht-Beihefter (DStR-Beih)*, 87-91.
- Schneider, J.-P., Erny, J., & Enderlein, F. (2024). Collaborative governance structures for interoperability in the EU's new data acts. *European Journal of Risk Regulation*, 15(1), 23-45. <https://doi.org/10.1017/err.2024.46>
- Schwaab, C. & Schnell, S. (2021). Vertragsgestaltung beim Einsatz von Smart Contracts zur Automatisierung von Lieferbeziehungen. *Betriebs-Berater*, 19, 1091-1098.
- Schrey, J., & Thalhofer, T. (2017). Rechtliche Aspekte der Blockchain. *Neue Juristische Wochenschrift*, 70(20), 1431-1436.
- Schulze-Fielitz, H. (2015). Art. 20a GG [Schutz der natürlichen Lebensgrundlage]. In H. Dreier (Ed.), *Grundgesetz-Kommentar* (3. Auflage, Band 2, S. 145-160). Mohr Siebeck.
- Siedler, N.-L. (2021). § 7 Rechtsfragen der Blockchain-Technologie. In F. Möslein & S. Omlor (Eds.), *FinTech-Handbuch* (2. Auflage, S. 138-179). C.H.Beck.
- Sinn, H.-W. (2008). *Das grüne Paradoxon: Plädoyer für eine illusionsfreie Klimapolitik* (1. Auflage.). Econ Verlag.
- SIX. (2022). *Sustainability Report 2022*. <https://www.six-group.com/dam/download/company/report/annual/2022/six-sustainability-report-2022.pdf>
- SIX. (2024, 03. Januar). *B1G Numbers 2023: Key Figures from SIX Swiss Exchange*. <https://www.six-group.com/en/newsroom/news/the-swiss-stock-exchange/2024/big-numbers-full-year-2023.html>
- Societe Generale. (2023, 04. Dezember). Societe Generale issues a first digital green bond on a public blockchain. <https://www.societegenerale.com/en/news/press-release/first-inaugural-digital-green-bond-public-blockchain>
- Specht, L., & Herold, S. (2018). Roboter als Vertragspartner? Gedanken zu Vertragsabschlüssen unter Einbeziehung automatisiert und autonom agierender Systeme. *Zeitschrift für IT-Recht und Recht der Digitalisierung*, 40-44.
- Spindler, G., & Wöbbeking, M. (2019). Kapitel 11. Smart Contracts und Verbraucherschutz. In T. Braegelmann & M. Kaulartz (Eds.), *Rechtshandbuch Smart Contracts* (1. Auflage, S. 321-341). C.H.Beck.
- Spindler, G. (2020). Datenschutzrechtliche Anforderungen an den Einsatz der Blockchain-Technologie im Aktienrecht. *Zeitschrift für Unternehmens- und Gesellschaftsrecht*, 49(5), 707-748. <http://doi.org/10.1515/zgr-2020-0039>
- Steinrötter, B. (2020). § 3 Internationale Zuständigkeit und anwendbares Recht bei der Transaktion von Kryptotoken auf dem Primär- und Sekundärmarkt. In P. Maume & L. Maute (Eds.), *Rechtshandbuch Kryptowerte. Blockchain, Tokenisierung, Initial Coin Offerings* (1. Auflage, S. 175-199). C.H.Beck.

- Steinrötter, B. (2021). Datenschutzrechtliche Probleme beim Einsatz von Blockchain. *Zeitschrift für Bankrecht und Bankwirtschaft*, 33(6), 373-390. <https://doi.org/10.15375/zbb-2021-0604>
- Stoll, C., Klaassen, L., & Gellersdörfer, U. (2019). The carbon footprint of Bitcoin. *Joule*, 3(7), 1647-1661. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.05.012>
- Taeger, J. (2016). Die Entwicklung des IT-Rechts im Jahr 2016. *Neue Juristische Wochenschrift*, 3764-3770.
- Terahash.space. (2023a). *Bitcoin Energy Forschungszentrum*. <https://terahash.space/energy/energy-lab-forschung/>
- Terahash.space. (2023b). *Bitcoin Mining als Innovativer Lösungsansatz*. <https://terahash.space/energy/bitcoin-mining-als-innovativer-loesungsansatz/>
- Terahash.space. (2024). *Erneuerbare Energien – Herausforderungen & Lösungsansätze*. <https://terahash.space/energy/herausforderung-klassische-loesungsansaeetze/>
- Tokenforge. (2024). *25M € Green Bond Tokenization*. <https://token-forge.io/de/use-cases/25-million-green-bond/>
- Toussaint, G. (2023). In V. Vorwerk & C. Wolf (Eds.), *Beck'scher Online Kommentar ZPO* (49. Auflage). C.H.Beck.
- Umweltbundesamt. (2025, 28. Januar). *Der Europäische Emissionshandel*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel#teilnehmer-prinzip-und-umsetzung-des-europaischen-emissionshandels>
- Umweltbundesamt. (2024). *Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen>
- United Nations Environment Programme, & International Resource Panel (2024). *Global Resources Outlook 2024 - Bend the trend: Pathways to a Liveable Planet as Resource Use Spikes*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44901>.
- United Nations. (2023). *Global report on blockchain and its implications on trade facilitation performance*. <https://unctad.org/publication/global-report-blockchain-and-its-implications-trade-facilitation-performance>
- Velický, M. (2023). Renewable energy transition facilitated by Bitcoin. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(8), 3160-3169. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c06077>
- Verivox. (2024). *Verbraucher-Atlas: Weltweite Strompreise*. <https://www.verivox.de/strom/verbraucheratlas/strompreise-weltweit/>
- Vlachos, I., Lima, C., Cali, U., Lin, J., Gindroz, B., Schlegel, W., & Tiwari, V. (2022). *Blockchain applications in the energy sector*. EU Blockchain Observatory Forum. [https://blockchain-observatory.ec.europa.eu/publications/blockchain-applications-energy-sector\\_en](https://blockchain-observatory.ec.europa.eu/publications/blockchain-applications-energy-sector_en)
- Wagner, H. (1995). Effizienz des Ordnungsrechts für den Umweltschutz? *Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht*, 14, 1046-1052.
- Weiss, A. (2022). Die Rückabwicklung einer Blockchain-Transaktion. *Neue Juristische Wochenschrift*, 1343-1349.
- Wendehorst, C., & Gritsch, D. (2023). Blockchain und Datenschutz. In S. Omlor & M. Link (Eds.), *Kryptowährungen und Token* (2. Auflage, S. 233-245).
- Wolff, H., Bachof, O., Stober, R., & Kluth, W. (2017). *Verwaltungsrecht – Band I* (13. Auflage). C.H.Beck.
- Wolff, J. (2020). *Anreize im Recht* (1. Auflage). Mohr Siebeck.
- Wood, G. (2024). *Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger – Paris version*. <https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf>

- Woods, J., James, N., Kozubal, E., Bonnema, E., Brief, K., Voeller, L., & Rivest, J. (2022). Humidity's impact on greenhouse gas emissions from air conditioning. *Joule*, 6(4), 726–741. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.03.012>
- World Bank. (2023). *About the „Zero routine flaring by 2030“ initiative.* <https://www.worldbank.org/en/programs/zero-routine-flaring-by-2030/about>
- Zech, H. (2022). Nachhaltigkeit und Digitalisierung im Recht. *Zeitschrift für Digitalisierung und Recht*, 123-134.
- Zhao, X. (2022). How blockchain can empower the growth in green finance. In *Proceedings of the 2022 2nd International Conference on Economic Development and Business Culture (ICEDBC)*, 412-416. [https://doi.org/10.2991/978-94-6463-036-7\\_60](https://doi.org/10.2991/978-94-6463-036-7_60)
- Zhou, Y., Wu, J., Long, C., & Ming, W. (2020). State-of-the-art analysis and perspectives for peer-to-peer energy trading. *Engineering*, 6(7), 739–753. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.06.002>
- Zickgraf, P. (2021a). Primärmarktpublizität in der Verordnung über die Märkte für Kryptowerte (MiCAR) - Teil 1. Eine kritische Untersuchung der Art. 4-14 des Kommissionsvorschlags. *Zeitschrift für Bank- und Kapitalmarktrecht*, 196-204.
- Zickgraf, P. (2021b). Primärmarktpublizität in der Verordnung über die Märkte für Kryptowerte (MiCAR) - Teil 2. *Zeitschrift für Bank- und Kapitalmarktrecht*, 362-370.

## A Anhang: Detaillierte Beschreibung der Methodik der quantitativen Analyse

### A.1 POS-Blockchains und Anwendungen

Die Berechnung ist primär in Nutzungsphase und Herstellungsphase unterteilt. Als Input beider werden die Eigenschaften des Netzwerks benötigt.

Die folgenden Punkte werden in diesem Abschnitt erläutert:

- ▶ In Abschnitt A.1.1 werden die in dieser Studie berücksichtigte Hardwares und Konfigurationen sowie die gewählte Verteilung der verschiedenen Hardwares vorgestellt.
- ▶ In Abschnitt A.1.2 werden die Methodik und die Berechnungsmethode für die Herstellungsphase sowie die detaillierten Ergebnisse der in Tabelle 11 dieses Berichts aufgeführten Ergebnisse (d. h. ADP, KEA und GWP für die Herstellungsphase von POS- und Ethereum- Blockchains) erläutert.
- ▶ In Abschnitt A.1.3 werden die Methodik und die Berechnungsmethode für die Nutzungsphase sowie die detaillierten Ergebnisse der in Tabelle 11 dieses Berichts aufgeführten Ergebnisse (d. h. ADP, KEA und GWP für die Nutzungsphase von POS- und Ethereum- Blockchains) erläutert.

#### A.1.1 Modellierung des Netzwerkes

Für den POS werden die Umweltauswirkungen der Herstellung und Nutzung verschiedener Hardware im Ethereum-Netzwerk modelliert. Wir folgen der vom CCAF getroffenen Auswahl der Hardware.<sup>97</sup> Es besteht aus Hardwarekonfigurationen, die die Systemanforderungen für verschiedene Ausführung-Clients (Geth, Erigon und Besu) sowie für verschiedene Konsens-Clients (Prism, Lighthouse, Teku, Nimbus und Lodestar) erfüllen. Die folgende Tabelle zeigt diese Hardware-Konfigurationen.

**Tabelle 15: POS-Hardwarekonfigurationen**

	Hardware 1	Hardware 2	Hardware 3
CPU	1x Intel i5-1135G7	1x Intel i5-10400	1x AMD 3970X
Cores/Threads	4/8	6/12	32/64
Architektur	x86/x64	x86/x64	x86/x64
RAM	1x 16 GB	1x 64 GB	1x 256 GB
Speicher	1x 2 TB SSD	1x 2 TB SSD	1x 2 TB SSD
GPU	onboard	onboard	AM 6970
PSU	65 W	650 W	1,000 W
Gehäuse	integriert	nach Maß	nach Maß

<sup>97</sup> Siehe Anhang 1, Ziffern 4 bis 6 der CCAF-Methodik (CCAF 2023b).

	Hardware 1	Hardware 2	Hardware 3
Operationssystem	Ubuntu 20.04	Ubuntu 21	Ubuntu 20.04

Quelle: CCAF (2024).

Ein durchschnittlicher Ethereum-Node zum Betrieb der oben genannten Clients wird anhand der folgenden Verteilung aus CCAF ermittelt:

**Tabelle 16: Hardware-Verteilung**

	Verteilung
Hardware 1	25%
Hardware 2	50%
Hardware 3	25%

Quelle: CCAF (2024).

### A.1.2 Herstellungsphase

Wir berechnen die Umweltauswirkungen der Herstellung der in Abschnitt A.1.1 beschriebenen Hardwares auf der Grundlage der KPI4DCE-Methode. Die Umweltauswirkungen (berechnet in Form der folgenden Wirkungskategorien: GWP, KEA, ADP) werden für die CPU (einschließlich der Kühlkörper), den RAM und die SSD, die Netzanteile sowie das Motherboard berechnet.

Auf dieser Weise werden für eine bestimmte Hardware die Wirkungskategorien als Summe der Wirkungskategorien der Teilkomponenten berechnet. Zum Beispiel wird die Wirkungskategorie *ADP* der Herstellung der Hardware *i* wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned}
 \text{Hardware}_{i,ADP} &= CPU_{i,ADP} + \text{Kühlkörper}_{i,ADP} + \text{RAM Module}_{i,ADP} + \text{SSD}_{i,ADP} \\
 &+ \text{Motherboard}_{i,ADP} + \text{Assembly}_{i,ADP} + \text{Rack Rest}_{i,ADP} + \text{PSU}_{i,ADP}
 \end{aligned}$$

Diese Formel wird im Abschnitt 3.2.1 dieses Berichts angewandt, um die drei Wirkungskategorien auf der Ebene des Ethereum-Netzwerks über ein Jahr zu berechnen.<sup>98</sup>

In den folgenden Abschnitten werden die Methoden zur Berechnung der Wirkungskategorien der verschiedenen Komponenten einer Hardware vorgestellt.

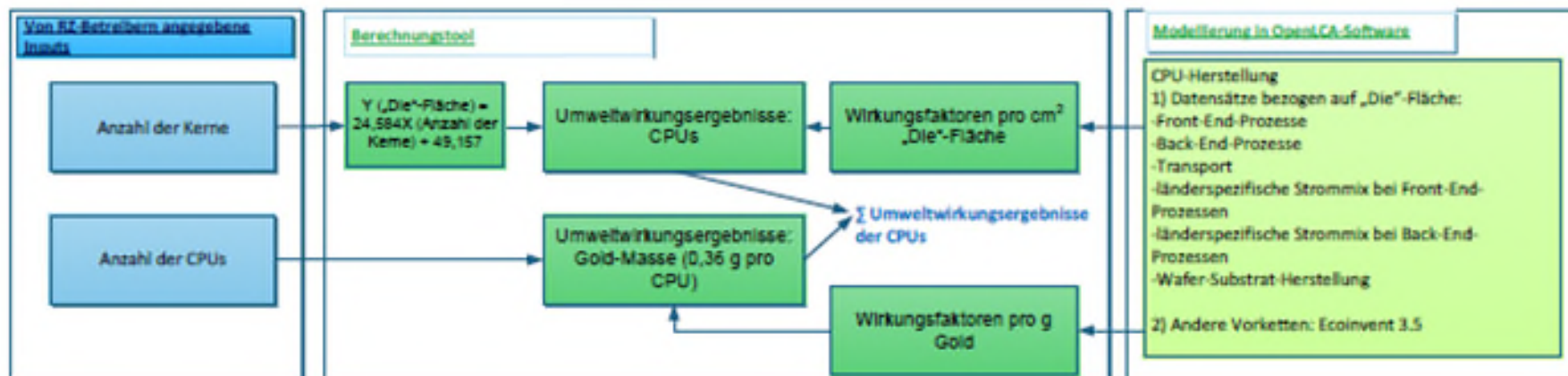
Die in den folgenden Formeln dargestellten Wirkungsfaktoren wurden vom UBA berechnet und können z. B. in UBA (2021) gefunden werden.

#### Herstellung der CPUs

Die folgende Abbildung zeigt den Berechnungsablauf für die Herstellung der CPUs.

<sup>98</sup> In einem ersten Schritt ermitteln wir die minimalen Hardwareanforderungen für den Betrieb eines Nodes im Netzwerk. Anschließend werden die Wirkungskategorien für diese Hardwareanforderungen berechnet und auf das gesamte Netzwerk hochgerechnet.

Abbildung 11: Berechnungsablauf der Herstellung der CPUs



Quelle: UBA (2021).

Zunächst werden, wie auf der rechten Seite der Abbildung dargestellt, verschiedene Wirkungsfaktoren in der Software OpenLCA modelliert. Die Wirkungsfaktoren, die vom UBA berechnet wurden und die öffentlich zugänglich sind, werden hierbei übernommen.

In einem zweiten Schritt wird die Die-Fläche auf Basis der Anzahl der Kerne einer CPU bzw. eines ASICs berechnet. Schließlich werden auf der Grundlage der Wirkungsfaktoren, der Die-Fläche, sowie der Gold-Masse pro CPU bzw. ASIC, Umweltwirkungsergebnisse berechnet. In unserer Analyse werden die Wirkungsfaktoren nicht neu berechnet. Stattdessen werden die vom UBA berechneten und im öffentlich zugänglichen Excel-Tool verfügbaren Faktoren verwendet. Die Die-Fläche berechnet sich aus der Anzahl der Kerne für die verschiedenen in diesem Bericht analysierten Prozessoren und einer linearen Beziehung zwischen der Anzahl der Kerne und der Die-Fläche, die vom UBA berechnet wurde (*Die Fläche* = 0,24584 × *Anzahl der Kerne* + 0,49157).

Die Wirkungskategorien (ADP, GWP, KEA) einer CPU-Herstellung für die verschiedenen in dieser Studie untersuchten Prozessoren werden mit der folgenden Formel berechnet:

$$CPU_{WK} = Anzahl\ CPU \times (Die - Fläche \times WF\ CPU\ Die\ Fläche_{WK} + 0,36\ g \times WF\ Gold_{WK} + WF\ Transport_{WK})$$

Dabei steht WF für den Wirkungsfaktor und WK für die Wirkungskategorie.

#### **Herstellung der CPU-Kühlkörper**

Die Anzahl der CPU-Kühlkörper steht mit der Anzahl der CPUs in einem proportionalen Verhältnis. Normalerweise hat jedes CPU einen eigenen passiven Kühlkörper. Daher wird für die Berechnung angenommen, dass die Anzahl der CPU-Kühlkörper gleich der Anzahl der CPUs ist.

Die Wirkungskategorien (ADP, GWP, KEA) einer Kühlkörper-Herstellung für die verschiedenen in dieser Studie untersuchten Prozessoren werden mit der folgenden Formel berechnet:

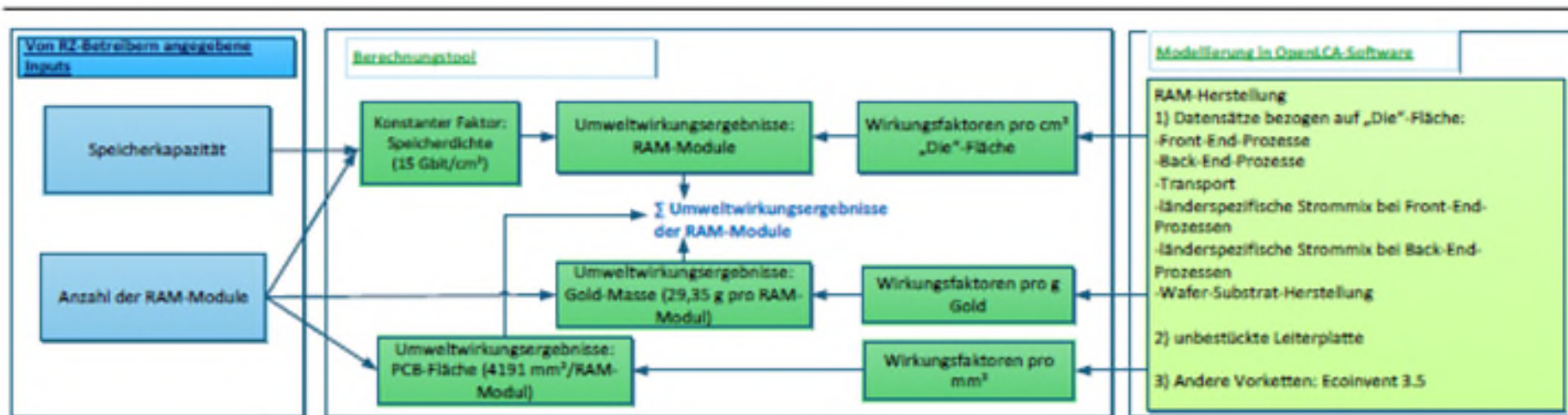
$$KK_{WK} = Anzahl\ CPU \times WF\ KK_{WK}$$

Dabei steht WF für den Wirkungsfaktor und WK für die Wirkungskategorie. Der Wirkungsfaktor für Kühlkörper (WF KK<sub>WK</sub>) wird vom UBA übernommen.

#### **Herstellung der RAM-Module**

Die folgende Abbildung zeigt den Berechnungsablauf für die Herstellung der RAM-Module.

Abbildung 12: Berechnungsablauf der Herstellung der RAM-Module



Quelle: UBA (2021).

Zunächst werden, wie auf der rechten Seite der Abbildung dargestellt, verschiedene Wirkungsfaktoren in der Software OpenLCA modelliert. Die Wirkungsfaktoren, die vom UBA berechnet wurden und öffentlich zugänglich sind, werden übernommen.

In dieser Studie wird für Speicherchips eine Speicherdichte von 15,01 Gbit/cm<sup>2</sup> angenommen. Dieser Wert, sowie die PCB-Fläche stammen ebenfalls aus der UBA-Studie.

Die Wirkungskategorien (ADP, GWP, KEA) einer SSD-Herstellung für die verschiedenen in dieser Studie untersuchten Prozessoren werden mit der folgenden Formel berechnet:

$$RAM\ Module_{WK} = Anzahl\ RAM\ Module \times (GByteRAM / RAM\ pro\ Die \times WF\ RAM\ Die\ Fläche_{WK} + 29,35\ mg \times WF\ RAM\ Gold_{WK} + WF\ RAM\ PCB_{WK} + WF\ RAM\ Transport_{WK})^{99}$$

Dabei steht WF für den Wirkungsfaktor und WK für die Wirkungskategorie.

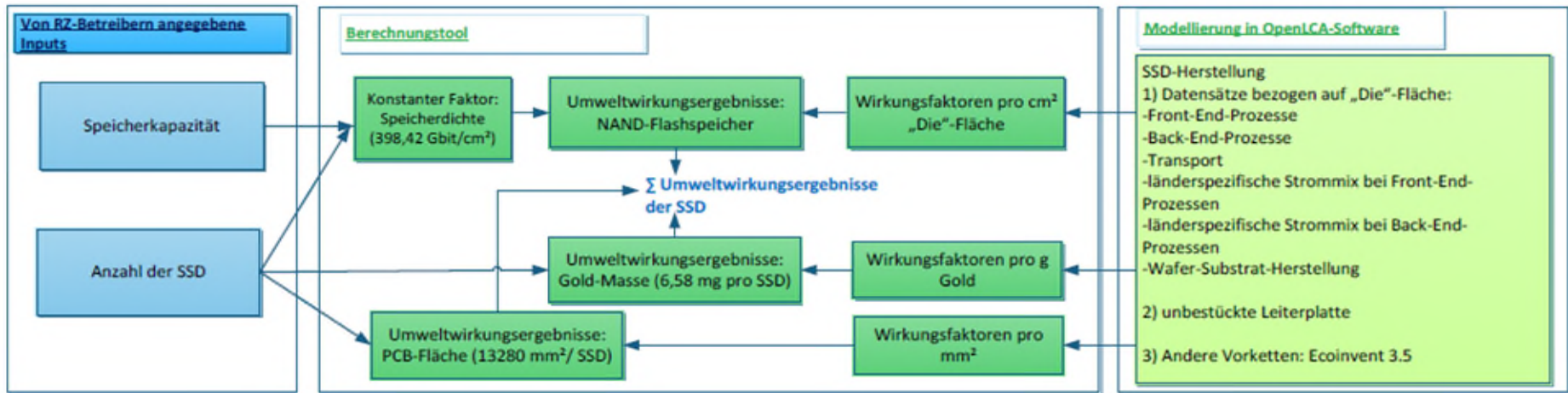
### **Herstellung der 2,5“ SSD**

Die folgende Abbildung zeigt den Berechnungsablauf für die Herstellung der 2,5“ SSD

---

99 Wir übernehmen die Schätzung von UBA von ca. 29,35 Milligramm Gold pro RAM-Module.

Abbildung 13: Berechnungsablauf der Herstellung der SSD



Quelle: UBA 2021.

In dieser Studie wird für SSD eine Speicherdichte von 398,42 Gbit/cm<sup>2</sup> angenommen. Dieser Wert wurde von UBA übernommen. Die PCB-Fläche (13.280 mm<sup>2</sup>/SSD), sowie die verschiedenen Wirkungsfaktoren sind ebenfalls aus der UBA-Studie übernommen.

Die Wirkungskategorien (ADP, GWP, KEA) einer RAM-Modul-Herstellung für die verschiedenen in dieser Studie untersuchten Prozessoren werden mit der folgenden Formel berechnet:

$$SSD_{WK} = \text{Anzahl der SSD} \times (\text{GByteSSD} / \text{NANDproDie} \times \text{WF NAND}_{WK} + \text{WF SSD PCB}_{WK} + \text{WF SSD Transport}_{WK})$$

Dabei steht WF für den Wirkungsfaktor und WK für die Wirkungskategorie.

#### Andere Komponenten der Herstellung

Die Herstellungsauswirkungen (ADP, GWP und KEA) der Motherboards, die Netzteile und restlichen Komponenten der Rack basieren auf den vom UBA und in OpenLCA berechneten Wirkungsfaktoren.

#### Ergebnisse pro Jahr und auf Netzwerkebene

Die für die in Abschnitt A.1.1 beschriebenen Hardwares erhaltenen Ergebnisse (ADP, GWP und KEA) werden pro Jahr gerechnet. Dazu wird die erwartete Nutzungsdauer verwendet, um die Ergebnisse pro Jahr herunterzurechnen. Die Verteilung, die ebenfalls in Abschnitt A.1.1 beschrieben ist, wird verwendet, um die Ergebnisse pro Jahr für eine durchschnittliche Hardware zu schätzen.

Sobald die Ergebnisse pro Jahr für eine durchschnittliche Hardware berechnet sind, werden sie auf der gesamten Netzwerkebene berechnet. Dazu werden die durchschnittlichen Ergebnisse pro Jahr mit der durchschnittlichen Anzahl der Nodes im gesamten Netzwerk multipliziert.

#### Quantifizierung der Berechnungsschritte

Im Folgenden werden die Schritte zur Berechnung von ADP, GWP und KEA pro Jahr für das Ethereum-Netzwerk dargestellt.

Die Berechnungen werden mithilfe der oben dargestellten Formeln durchgeführt und folgen den folgenden Schritten:

- ▶ **Schritt 1 - ADP, GWP und KEA pro Hardware-Typ und über gesamte Nutzungsdauer:** Die Kennzahlen ADP, GWP, KEA werden für die in Anhang A.1.1 dargestellten Hardware-Typen getrennt (pro Gerät) berechnet. Hierbei wird jeweils die gesamte Nutzungsdauer berücksichtigt.
- ▶ **Schritt 2 - Standardisierung auf ein Jahr:** Die in Schritt 1 berechneten Kennzahlen je Nutzungsdauer werden auf die Dauer eines Jahres standardisiert.
- ▶ **Schritt 3 - Durchschnittliche Ethereum-Node:** Aus den in Schritt 2 ermittelten Werten pro Hardware-Typ und Jahr wird ein Durchschnitt ermittelt. Dies ergibt den durchschnittlichen jährlichen KPI-Wert für ADP, GWP und KEA für einen repräsentativen Ethereum-Node.
- ▶ **Schritt 4 - Ethereum-Netzwerk:** Multiplikation der für einen durchschnittlichen Ethereum-Node berechneten ADP, GWP und KEA mit der Anzahl der aktiven Ethereum-Nodes über ein Jahr. Die Ergebnisse dieses letzten Schrittes bestehen aus den folgenden Ergebnissen: geschätztes ADP, GWP und KEA pro Jahr für das Ethereum-Netzwerk.

Die vier Schritte werden nachfolgend mit Zahlen erläutert.

### Schritt 1 ADP, GWP und KEA pro Hardware-Typ und über gesamte Nutzungsdauer:

Im ersten Schritt werden die KPIs ADP, GWP und KSA für jeden Hardware-Typ berechnet. Die Berechnung der verschiedenen KPIs für einen Hardware-Typ kann hierbei als Funktion aus Wirkungsfaktoren und Hardwarespezifikation zusammengefasst werden:

$$KPI = f(\text{Wirkungsfaktoren}, \text{Hardware Spezifikation})$$

Die gleiche Methodik, wie zu Beginn dieses Abschnitts bereits erläutert, wird somit auf alle Hardware-Typen und alle KPIs angewandt. Die Formeln zur Berechnung von ADP, GWP und KEA unterscheiden sich daher nicht voneinander. Den Berechnungen liegen jedoch unterschiedliche Wirkungsfaktoren und Hardware-Spezifikationen zugrunde. Da die Berechnung gleichzeitig jeweils für drei Hardware-Typen und drei KPIs durchgeführt wird, ergeben sich insgesamt neun Berechnungen. Diese basieren auf folgender Formel (siehe auch oben):

$$\begin{aligned} \text{Hardware}_{i,WK} = & \text{CPU}_{i,WK} + \text{Kühlkörper}_{i,WK} + \text{RAM Module}_{i,WK} + \text{SSD}_{i,WK} \\ & + \text{Motherboard}_{i,WK} + \text{Assembly}_{i,WK} + \text{Rack Rest}_{i,WK} + \text{PSU}_{i,WK} \end{aligned}$$

Die Annahmen bzgl. Hardware-Spezifikation befinden sich in Tabelle 15. Die Wirkungsfaktoren wurden aus vorgängigen UBA-Studien entnommen (UBA 2021).

Zur Illustration werden im Folgenden die Berechnungen für den KPI ADP der Hardware 2 vorgestellt:

$$\begin{aligned} \text{Hardware}_{2,ADP} & \\ & = \text{CPU}_{2,ADP} + \text{Kühlkörper}_{2,ADP} + \text{RAM Module}_{2,ADP} + \text{SSD}_{2,ADP} \\ & + \text{Motherboard}_{2,ADP} + \text{Assembly}_{2,ADP} + \text{Rack Rest}_{2,ADP} + \text{PSU}_{2,ADP} \end{aligned}$$

Das Ergebnis des ersten Elements (CPU<sub>2,ADP</sub>) ist im Folgenden detailliert aufgeführt:

$$\begin{aligned} \text{CPU}_{2,ADP} = & \text{Anzahl CPU}_2 * (\text{Die} - \text{Fläche}_2 * \text{WF CPU Die Fläche}_{ADP} + 0,36 \text{ g} * \text{WF Gold}_{ADP} \\ & + \text{WF Transport}_{ADP}) \end{aligned}$$

Wobei,

- ▶ Anzahl CPU<sub>2</sub> = 1 (Tabelle 15)
- ▶ Die – Fläche = Beta – Koeffizient × Anzahl der Kerne + Konstante, mit:
  - Beta – Koeffizient = 0,24584 (UBA 2021)
  - Anzahl Kerne = 6 (Tabelle 15)
  - Konstante = 0,49157 (UBA 2021)
- ▶ WF CPU Die-Fläche<sub>ADP</sub> = 0,00000058655 (UBA 2021)
- ▶ 0,36 g x WF Gold<sub>ADP</sub> = 0,019933849 (UBA 2021)
- ▶ WF Transport<sub>ADP</sub> = 0,0000000432748 (UBA 2021)

Die Anwendung der Formel führt zu folgendem Ergebnis: CPU<sub>2,ADP</sub> = 0,019935046

Alle anderen Elemente von Hardware 2 lassen sich mit der gleichen Vorgehensweise unter Anwendung der zu Beginn dieses Abschnitts vorgestellten Formel berechnen (vgl. auch Fussnoten in Tabelle 17). Die Ergebnisse aller Komponenten von Hardware 2 sind in der nächsten Tabelle dargestellt.

**Tabelle 17: Ergebnisse für Hardware<sub>2,ADP</sub>**

	ADP-Ergebnisse für Hardware 2
CPU <sub>2,ADP</sub>	0,020100
Kühlkörper <sub>2,ADP</sub>	0,00051101
RAM Module <sub>2,ADP</sub>	0,0038102
SSD <sub>2,ADP</sub>	0,0031103
Motherboard <sub>2,ADP</sub>	0,0037104
Assembly <sub>2,ADP</sub>	0,0000014105
Rack Rest <sub>2,ADP</sub>	0,020106
PSU <sub>2,ADP</sub>	0,017107
<b>Hardware<sub>2,ADP</sub></b>	<b>0,068</b>

Quelle: Eigene Berechnung.

Hardware<sub>2,GWP</sub>, Hardware<sub>2,KEA</sub> und die zwei anderen KPIs (GWP, KEA) für die Hardwares 1 und 3 werden nach demselben Ansatz berechnet (aber mit unterschiedlicher Hardware-Spezifikation).

100 CPU<sub>2,ADP</sub> = Anzahl CPU x (Die-Fläche x WF CPU Die-FlächeADP + 0,36 g x WF GoldADP + WF TransportADP) = 1 x (1.96 x 5,87E-07 + 1.99E-02 + 4.33E-08) = 0,02. (vgl. Tabelle 15 und UBA 2021).

101 KK<sub>2,ADP</sub> = Anzahl CPU x WF KKWK = 1 x 5.10E-04 = 5.10E-04 (vgl. Tabelle 15 und UBA 2021).

102 RAM Module<sub>2,ADP</sub> = Anzahl RAM Module x (GByteRAM / RAMproDie x WF RAM Die-FlächeWK + 29,35 mg x WF RAM GoldWK + WF RAM PCBWK + WF RAM TransportWK) = 1 x (64 / 1,875 \* 6.30E-05 + 1.63E-03 + 6.23E-05 + 3.75E-07) = 3.84E-03 (vgl. Tabelle 21 und UBA 2021).

103 SSD<sub>2,ADP</sub> = Anzahl der SSD x (GByteSSD / NANDproDie x WF NANDWK + WF SSD PCBWK + WF SSD TransportWK) = 1 x (2000 / 49.8 x 6.30E-05 + 5.63E-04 + 7.86E-08) = 3.09E-03 (vgl. Tabelle 21 und UBA 2021).

104 Motherboard<sub>2,ADP</sub> = 1 x MotherboardWF = 3.69E-03 (vgl. UBA 2021).

105 Assembly<sub>2,ADP</sub> = 1 x AssemblyWF = 1.41E-06 (vgl. UBA 2021).

106 Rack Rest<sub>2,ADP</sub> = 1 x Rack RestWF = 0,020 (vgl. UBA 2021).

107 PSU<sub>2,ADP</sub> = 1 x PSUWF \* 2 kg = 0,017 (vgl. UBA 2021).

**Tabelle 18: KPIs für Hardware 1, 2 und 3**

	Hardware 1	Hardware 2	Hardware 3
ADP	0,066	0,068	0,074
GWP	401,5	458,7	696,4
KEA	5.485,8	6.198,7	9.168,1

Quelle: Eigene Berechnung.

### Schritt 2 Standardisierung auf ein Jahr:

Nach der Berechnung für die gesamte Nutzungsdauer eines Hardware-Typen, werden die drei KPIs auf ein Jahr standardisiert. D.h. die Ergebnisse für jeden Hardware-Typ werden durch ihre jeweilige Nutzungsjahre dividiert. Wir nehmen hierbei eine Nutzungsdauer von drei Jahren an.<sup>108</sup>

**Tabelle 19: Wirkungskategorien für Hardware 1, 2 und 3 pro Jahr**

	Hardware 1	Hardware 2	Hardware 3
ADP pro Jahr	0,022	0,023	0,025
GWP pro Jahr	133,8	152,9	232,1
KEA pro Jahr	1.828,6	2.066,2	3.056,0

Quelle: Eigene Berechnung.

### Schritt 3 Durchschnittliche Ethereum-Node:

Im nächsten Schritt wird ein gewichteter Durchschnitt des ADP, GWP und KEA pro Jahr für die drei Hardware berechnet, wobei die in A.1.1 dargestellte Verteilung verwendet wird. Wir berechnen also die KPI für einen repräsentativen Ethereum-Node.

Das Ergebnis für ADP wird zur Illustration wiederum dargestellt:

$$\begin{aligned}
 & \text{Durchschnitt ADP pro Jahr und pro Ethereum Node} \\
 & = 25\% \times \text{Hardware}_{1,ADP} \text{ pro Jahr} + 50\% \times \text{Hardware}_{2,ADP} \text{ pro Jahr} \\
 & + 25\% \times \text{Hardware}_{3,ADP} \text{ pro Jahr} +
 \end{aligned}$$

Wobei,

- ▶  $\text{Hardware}_{1,ADP} \text{ pro Jahr} = 0,022$
- ▶  $\text{Hardware}_{2,ADP} \text{ pro Jahr} = 0,023$
- ▶  $\text{Hardware}_{3,ADP} \text{ pro Jahr} = 0,025$

Auf diese Weise werden die durchschnittlichen KPIs ADP, GWP und KEA pro Jahr und pro Ethereum-Node berechnet. Die Ergebnisse sind wie folgt:

- ▶ Durchschnittliches geschätztes ADP pro Jahr und pro Ethereum-Node: 0,02
- ▶ Durchschnittliches geschätztes GWP pro Jahr und pro Ethereum-Node: 167,95
- ▶ Durchschnittliches geschätztes KEA pro Jahr und pro Ethereum-Node: 2.254,28

<sup>108</sup> Siehe z.B. Posey & Gillis (2024).

#### **Schritt 4 Ethereum-Netzwerk:**

Im letzten Schritt werden diese drei Durchschnittswerte mit der geschätzten Anzahl der aktiven Nodes im Ethereum-Netzwerk multipliziert.

Für die Schätzung der Anzahl Nodes wird der gleitende Durchschnitt über einen Zeitraum von sieben Tagen verwendet. Für den 1.1.2024 entspricht dies gem. Daten von MigaLabs (monitoreth.io 2023)<sup>109</sup> 12.777 Nodes (mit  $\sum_{d-6}^d \frac{N_d}{7}$ ,  $d = 1.1.2024$  und  $d-6=26.12.2023$ ).

Das Ergebnis ist eine Schätzung von ADP, GWP und KEA pro Jahr der Herstellungsphase für das Ethereum-Netzwerk:

- ▶ Durchschnittliches geschätztes ADP pro Jahr: 294
- ▶ Durchschnittliches geschätztes GWP pro Jahr: 2.145.835
- ▶ Durchschnittliches geschätztes KEA pro Jahr: 28.802.602

Diese Ergebnisse sind in Tabelle 11 als Resultate wiedergegeben.

---

109 Vgl. auch CCAF (2023c)

### A.1.3 Nutzungsphase

Um die Nutzungsphase eines POS-Blockchains zu modellieren, wird auf die Studie der CCRI (2022) und die Methodenbeschreibung der CCAF (2023b) abgestützt. Im Folgenden wird kurz erläutert, wie genau die Berechnungen für den jährlichen Stromverbrauch und CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen durchgeführt wurden.

#### Stromverbrauchsberechnungen

Der annualisierte Stromverbrauch, der das Endprodukt der Berechnung ist, wird anhand der folgenden Gleichung geschätzt:

$$E_{ETH,d} = D_{ETH,d} \times 60 \text{ s} \times 60 \text{ min} \times 24 \text{ h} \times 365,25 \text{ Tage}$$

Wobei,

- ▶  $D_{ETH,d}$ : Elektrizitätsnachfrage pro Sekunde auf dem Ethereum-Netz am Tag  $d$  [W]

$D_{ETH,d}$  wird wie folgt berechnet:

$$D_{ETH,d} = \left[ \sum_{i=1}^3 \left[ \sum_{c \in C} \sum_{e \in E} (AMC_{c,i} + AMC_{e,i} + AIC_i) \times S_{c,e,d} \right] \times H_i \right] \times N_d$$

Wobei,

- ▶  $AMC_{c,i}$ : Durchschnittliche marginale elektrische Leistung für den Betrieb des Konsens-Clients  $c$  auf der Hardwarekonfiguration  $i$  in J/s
- ▶  $AMC_{e,i}$ : Durchschnittliche marginale elektrische Leistung für den Betrieb des Ausführung-Clients  $e$  auf der Hardwarekonfiguration  $i$  in J/s
- ▶  $AIC_i$ : Durchschnittlicher Stromverbrauch der Hardwarekonfiguration  $i$  im Leerlauf in J/s
- ▶  $S_{c,e,d}$ : Anteil der Kombination aus Konsens-Client  $c$  und Ausführungs-Client  $e$  am Tag  $d$
- ▶  $H_i$ : Anteil der Hardwarekonfiguration  $i$
- ▶  $N_d$ : Anzahl der aktiven Beacon Nodes am Tag  $d$
- ▶  $AMC$  und  $AIC$ : Durchschnittliche marginale elektrische Leistung für den Betrieb des Clients und durchschnittlicher Stromverbrauch der Hardwarekonfigurationen im Leerlauf

Die marginale elektrische Leistung, die für den Betrieb der Konsens- und Ausführung-Clients für die drei in Abschnitt A.1.1 beschriebenen Hardware-Konfigurationen erforderlich ist, wird vom CCAF zur Verfügung gestellt (in Joule pro Sekunde). Wir stützen unsere Berechnungen auf diese Angaben. Diese Schätzungen können von der CCAF-Website heruntergeladen werden (Anhänge 5-7 in der Ethereum-Methodik) und sind unten dargestellt.

Es ist nicht nur erforderlich, den Stromverbrauch in Betrieb zu kennen, sondern auch wenn sich die Hardware im Leerlauf befindet. Der Stromverbrauch der einzelnen Hardwarekonfigurationen im Leerlauf ist ebenfalls in den nachstehenden Tabellen aufgeführt.

**Tabelle 20: Durchschnittliche marginale elektrische Leistung für den Betrieb von Clients mit Hardware 1**

Konsens-Client	Ausführung-Client	Ø Stromverbrauch in Leerlauf in J/s	Ø marg. Leistung für den Konsens-Client Betrieb in J/s	Ø marg. Leistung für den Ausführung-Client Betrieb in J/s	Total in J/s
Prysm	Geth	3,66	3,51	11,23	18,40
Prysm	Erigon	3,66	3,51	18,60	25,77
Prysm	Hyperledger Besu	3,66	3,51	30,25	37,42
Lighthouse	Geth	3,66	2,75	11,23	17,64
Lighthouse	Erigon	3,66	2,75	18,6	25,01
Lighthouse	Hyperledger Besu	3,66	2,75	30,25	36,66
Teku	Geth	3,66	3,71	11,23	18,60
Teku	Erigon	3,66	3,71	18,6	25,97
Teku	Hyperledger Besu	3,66	3,71	30,25	37,62
Nimbus	Geth	3,66	1,67	11,23	16,56
Nimbus	Erigon	3,66	1,67	18,6	23,93
Nimbus	Hyperledger Besu	3,66	1,67	30,25	35,58
Lodestar	Geth	3,66	3,14	11,23	18,03
Lodestar	Erigon	3,66	3,14	18,6	25,40
Lodestar	Hyperledger Besu	3,66	3,14	30,25	37,05

Quelle: CCAF (2024).

**Tabelle 21: Durchschnittliche marginale elektrische Leistung für den Betrieb von Clients mit Hardware 2**

Konsens-Client	Ausführung-Client	Ø Stromverbrauch in Leerlauf in J/s	Ø marg. Leistung für den Konsens-Client Betrieb in J/s	Ø marg. Leistung für den Ausführung-Client Betrieb in J/s	Total in J/s
Prysm	Geth	25,04	2,87	9,70	37,61
Prysm	Erigon	25,04	2,87	17,59	45,50
Prysm	Hyperledger Besu	25,04	2,87	31,02	58,93

Konsens-Client	Ausführung-Client	Ø Stromverbrauch in Leerlauf in J/s	Ø marg. Leistung für den Konsens-Client Betrieb in J/s	Ø marg. Leistung für den Ausführung-Client Betrieb in J/s	Total in J/s
Lighthouse	Geth	25,04	3,14	9,7	37,88
Lighthouse	Erigon	25,04	3,14	17,59	45,77
Lighthouse	Hyperledger Besu	25,04	3,14	31,02	59,20
Teku	Geth	25,04	3,32	9,7	38,06
Teku	Erigon	25,04	3,32	17,59	45,95
Teku	Hyperledger Besu	25,04	3,32	31,02	59,38
Nimbus	Geth	25,04	2,08	9,7	36,82
Nimbus	Erigon	25,04	2,08	17,59	44,71
Nimbus	Hyperledger Besu	25,04	2,08	31,02	58,14
Lodestar	Geth	25,04	3,89	9,7	38,63
Lodestar	Erigon	25,04	3,89	17,59	46,52
Lodestar	Hyperledger Besu	25,04	3,89	31,02	59,95

Quelle: CCAF (2024).

**Tabelle 22: Durchschnittliche marginale elektrische Leistung für den Betrieb von Clients mit Hardware 3**

Konsens-Client	Ausführung-Client	Ø Stromverbrauch in Leerlauf in J/s	Ø marg. Leistung für den Konsens-Client Betrieb in J/s	Ø marg. Leistung für den Ausführung-Client Betrieb in J/s	Total in J/s
Prysm	Geth	78,17	24,33	47,70	150,20
Prysm	Erigon	78,17	24,33	44,62	147,12
Prysm	Hyperledger Besu	78,17	24,33	75,04	177,54
Lighthouse	Geth	78,17	18,84	47,7	144,71
Lighthouse	Erigon	78,17	18,84	44,62	141,63
Lighthouse	Hyperledger Besu	78,17	18,84	75,04	172,05
Teku	Geth	78,17	27,46	47,7	153,33

Konsens-Client	Ausführung-Client	Ø Stromverbrauch in Leerlauf in J/s	Ø marg. Leistung für den Konsens-Client Betrieb in J/s	Ø marg. Leistung für den Ausführung-Client Betrieb in J/s	Total in J/s
Teku	Erigon	78,17	27,46	44,62	150,25
Teku	Hyperledger Besu	78,17	27,46	75,04	180,67
Nimbus	Geth	78,17	17,11	47,7	142,98
Nimbus	Erigon	78,17	17,11	44,62	139,90
Nimbus	Hyperledger Besu	78,17	17,11	75,04	170,32
Lodestar	Geth	78,17	33,55	47,7	159,42
Lodestar	Erigon	78,17	33,55	44,62	156,34
Lodestar	Hyperledger Besu	78,17	33,55	75,04	186,76

Quelle: CCAF (2024).

Um den täglichen Stromverbrauch eines durchschnittlichen Ethereum-Nodes berechnen zu können, ist es auch notwendig, die täglichen Verteilungen der Ausführung- und Konsens-Clients zu kennen. Die täglichen Verteilungen sind auch auf der CCAF-Website verfügbar.

Es sei darauf hingewiesen, dass der CCAF nicht alle für Ethereum verfügbaren Clients abdeckt, sondern nur die überwiegende Mehrheit. Darüber hinaus ist zu beachten, dass der CCAF eine tägliche Verteilung für Konsens-Clients angibt, aber keine derartigen Informationen für Ausführung-Clients hat. Der CCAF nimmt für Konsens-Clients eine konstante Verteilung an. Die Verteilung für den 01.01.2024 ist in den nächsten beiden Tabellen dargestellt.

**Tabelle 23: Verteilung der Konsens-Clients**

Datum	Prism	Lighthouse	Teku	Nimbus	Lodestar	Grandine	Erigon	Andere
2024-01-01	35,57%	35,97%	13,16%	9,74%	3,04%	1,21%	1,13%	0,18%

Quelle: CCAF (2024).

**Tabelle 24: Verteilung der Ausführung-Clients (konstant über die Zeit)**

Datum	Geth	Erigon	Hyperledger Besu
2024-01-01	35,57%	35,97%	13,16%

Quelle: CCAF (2024).

Da, wie bereits erwähnt, nicht die Gesamtheit der Clients berücksichtigt wird, summieren sich die Prozentsätze nicht auf 100%. In einem weiteren Schritt ist es daher notwendig, die Prozentsätze so zu korrigieren, dass sie in der Summe 100% ergeben.

Die Anteile der drei verschiedenen Hardwares, die für die Berechnungen in Betracht kommen, sind in Abschnitt A.1.1 beschrieben.

### CO<sub>2</sub> eq.-Emissionsberechnung

Die Daten des CCAF werden auch verwendet, um die jährlichen Treibhausgasemissionen von Ethereum zu schätzen. Dies geschieht durch Multiplikation des in den vorherigen Schritten berechneten Stromverbrauchs ( $E_{ETH,d}$ ) mit einem Emissionsfaktor in g CO<sub>2</sub> eq./kWh. Die von der CCAF bereitgestellten Emissionsfaktoren basieren auf der globalen Verteilung der Nodes.

Die Formel zur Berechnung der jährlichen Treibhausgasemissionen lautet wie folgt:

$$G_{ETH,d} = I_{ETH,d} \times E_{ETH,d}$$

Wobei,

- ▶  $I_{ETH,d}$ : Emissionsintensität am Tag  $d$ , gemessen in g CO<sub>2</sub> eq./kWh
- ▶  $E_{ETH,d}$ : Annualisierter Ethereum-Stromverbrauch am Tag  $d$  (siehe vorherige Absätze)

Die geschätzte Emissionsintensität wird vom CCAF zur Verfügung gestellt. Die Berechnungen in diesem Bericht stützen sich ebenfalls auf diese Schätzung.

Die CCAF berechnet diese Schätzung unter Verwendung der folgenden zwei Inputs:

- ▶ Anteil der Energieträger am weltweiten Strommix am Tag  $d$ .
- ▶ Äquivalente Emissionen der Energiequelle  $s$ , gemessen in g CO<sub>2</sub> eq./kWh,

und unter der Annahme, dass die Aktivität der Nodes proportional über die Welt verteilt ist, basierend auf dem Anteil der einzelnen Länder an der gesamten globalen Stromproduktion, was bedeutet, dass der weltweite Strommix eine akkurate Annäherung ist.

### Quantifizierung der Berechnungsschritte

#### Stromverbrauchsberechnungen

Um die Ergebnisse von Tabelle 11 zu erhalten, werden nachfolgend die Rechenschritte quantifiziert, die auf den oben beschriebenen Formeln und Input-Daten beruhen.

Wir gehen hierbei in fünf Schritten vor:

- ▶ Schritt 1: Berechnung der durchschnittlichen Leistung des Ethereum-Netzwerks  $D_{ETH,d}$  (J/s)
- ▶ Schritt 2: Berechnung des annualisierten Stromverbrauchs  $E_{ETH,d}$  (J/a)
- ▶ Schritt 3: Berechnung der Ergebnisse in verschiedenen Maßeinheiten
- ▶ Schritt 4: Anpassung an den Primärenergiefaktor des deutschen Strommixes
- ▶ Schritt 5: Berechnung der CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen

#### Schritt 1: Durchschnittliche Leistung des Ethereum-Netzwerks $D_{ETH,d}$ (J/s)

Die Berechnung der durchschnittlichen Leistung gemessen in Joule pro Sekunde erfolgt durch die folgende Formel:

$$D_{ETH,d} = \left[ \sum_{i=1}^3 \left[ \sum_{c \in C} \sum_{e \in E} (AMC_{c,i} + AMC_{e,i} + AIC_i) \times S_{c,e,d} \right] \times H_i \right] \times N_d$$

Diese Formel berechnet die durchschnittliche Leistung des Ethereum-Netzwerks, indem der Energieverbrauch für verschiedene Client- und Hardwarekonfigurationen aufsummiert wird:

1. Für jede der drei Hardwarekonfigurationen  $i$  (siehe Anhang A.1.1) wird die durchschnittliche Leistung (in Joule pro Sekunde) berechnet, die benötigt wird, um eine spezifische Kombination aus Konsens-Client und Ausführungs-Client auf dieser Hardware zu betreiben ( $\sum_{e \in E} (AMC_{c,i} + AMC_{e,i} + AIC_i)$ ). Dabei wird sowohl der aktive Stromverbrauch (marginale Leistung für die beiden Client-Typen) als auch der Leerlaufverbrauch der Hardwarekonfiguration berücksichtigt. Die Annahmen zu  $AMC_{c,i}$ ,  $AMC_{e,i}$ ,  $AIC_i$  sind in Tabelle 20 bis Tabelle 22 beschrieben. Das Resultat beschreibt die durchschnittliche Leistung für eine spezifische Kombination der beiden Client-Typen.
2. Im Netzwerk gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Kombinationen der beiden Client-Typen. Die Summe aus Schritt 1 wird deshalb mit dem aktuellen Anteil jeder spezifischen Kombination ( $S_{c,e,d}$ ) multipliziert. Das Resultat ( $[\sum_{c \in C} \sum_{e \in E} (AMC_{c,i} + AMC_{e,i} + AIC_i) \times S_{c,e,d}]$ ) entspricht der Leistung für einen Node mit durchschnittlicher Client-Typ-Kombination. Die Annahmen zu  $S_{c,e,d}$  befinden sich in Tabelle 23 und Tabelle 24.

3. Die Client-Typ-Kombination kann mit unterschiedlicher Hardware-Konfiguration ausgeführt werden. Die in Schritt 2 berechnete Summe wird deshalb mit dem Anteil der jeweiligen Hardwarekonfiguration gewichtet ( $H_i$ ). Das Resultat entspricht der Leistung für eine durchschnittliche Node  $[\sum_{i=1}^3 [\sum_{c \in C} \sum_{e \in E} (AMC_{c,i} + AMC_{e,i} + AIC_i) \times S_{c,e,d}] \times H_i]$ . Die Annahmen zu  $H_i$  befinden sich in Tabelle 15.
4. Schließlich wird das Ergebnis mit der Gesamtzahl der aktiven Nodes am Tag  $d$ , multipliziert, um den gesamten Energiebedarf des Ethereum-Netzwerks an diesem Tag zu ermitteln. Die Anzahl der aktiven Nodes kann aus MigaLabs (monitoreth.io 2023) entnommen werden. Am 1. Januar 2024 gab es 12.777 aktive Nodes.<sup>110</sup>

Für den 1. Januar 2024 ergibt die Berechnung von  $D_{ETH,d}$  einen Wert von 801.534 J/s.

### Schritt 2: Annualisierter Stromverbrauch $E_{ETH,d}$ (J/a)

Der annualisierte Stromverbrauch wird berechnet, indem die durchschnittliche Leistung (J/s) aus dem vorherigen Schritt mit der Anzahl Sekunden pro Jahr multipliziert wird:

$$E_{ETH,d} = D_{ETH,d} \times 60 \text{ s} \times 60 \text{ min} \times 24 \text{ h} \times 365,25 \text{ Tage}$$

Hierbei wird die durchschnittliche Leistung zuerst mit 60 (Sekunden pro Minute), dann erneut mit 60 (Minuten pro Stunde), 24 (Stunden pro Tag) und schließlich mit 365,25 (durchschnittliche Anzahl der Tage pro Jahr unter Berücksichtigung von Schaltjahren) multipliziert. Das Ergebnis ist der geschätzte jährliche Stromverbrauch des Ethereum-Netzwerks.

Für den 1. Januar 2024 ergibt die Berechnung von  $E_{ETH,d}$  nach diesen Schritten: 25,294,482,722,801 J/a.

### Schritt 3 Berechnung der Ergebnisse in verschiedenen Maßeinheiten

Der jährliche Stromverbrauch aus Schritt 2 wird in MJ und kWh ausgedrückt bzw. umgerechnet:

- ▶ 25.294.483 MJ/a
- ▶ 7.026.245 kWh/a

### Schritt 4: Anpassung an den Primärenergiefaktor des deutschen Strommixes

Der in Kilowattstunden ausgedrückte jährliche Stromverbrauch (7.026.245 kWh) wird anschließend an den Primärenergiefaktor des deutschen Strommixes angepasst, um den Primärenergiebedarf zu berechnen:

$$7.026.245 \text{ kWh} \times 10,7 \text{ MJ/kWh} = 75.180.824 \text{ MJ/a}$$

### Schritt 5: CO<sub>2</sub> eq.-Emissionsberechnung

Die CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen werden auf 2.561.511 kg CO<sub>2</sub> eq. geschätzt (siehe Tabelle 11). Sie werden berechnet, indem die Emissionsintensität am 1.1.2024 von 0,36 kg CO<sub>2</sub> eq./kWh mit den in kWh ausgedrückten Stromverbrauchsberechnungen (7.026.245 kWh) multipliziert wird. Die Formeln sind weiter oben in diesem Abschnitt dargestellt. Die Emissionsintensität von 0,36 CO<sub>2</sub> eq./kWh beruht auf Schätzungen des CCAF. Diese stützt sich auf Schätzungen zur globalen Verteilung der Nodes (vgl. auch monitoreth.io (2023), CCAF (2023c), den Strommix in den einzelnen Ländern und Regionen (v.a. Ritchie et al. (2024) sowie auf die Emissionsfaktoren der einzelnen Energieträger des National Renewable Energy Laboratory (2021).

<sup>110</sup> Für die Schätzung der Anzahl Nodes wird der gleitende Durchschnitt über einen Zeitraum von sieben Tagen verwendet. Für den 1.1.2024 entspricht dies gem. Daten MigaLabs (monitoreth.io 2023) bzw CCAF (2023c) 12'777 Nodes (mit  $\sum_{d=6}^d \frac{N_d}{7}$ ,  $d=1.1.2024$  und  $d-6=26.12.2023$ ).

## A.2 POW-Blockchains und Anwendungen

### A.2.1 Modellierung des Netzwerkes

Die folgende Tabelle zeigt die drei Mining-Hardwares, die für die Berechnung des Strombedarfs und der Umweltauswirkungen des Bitcoin-Netzwerks verwendet werden.

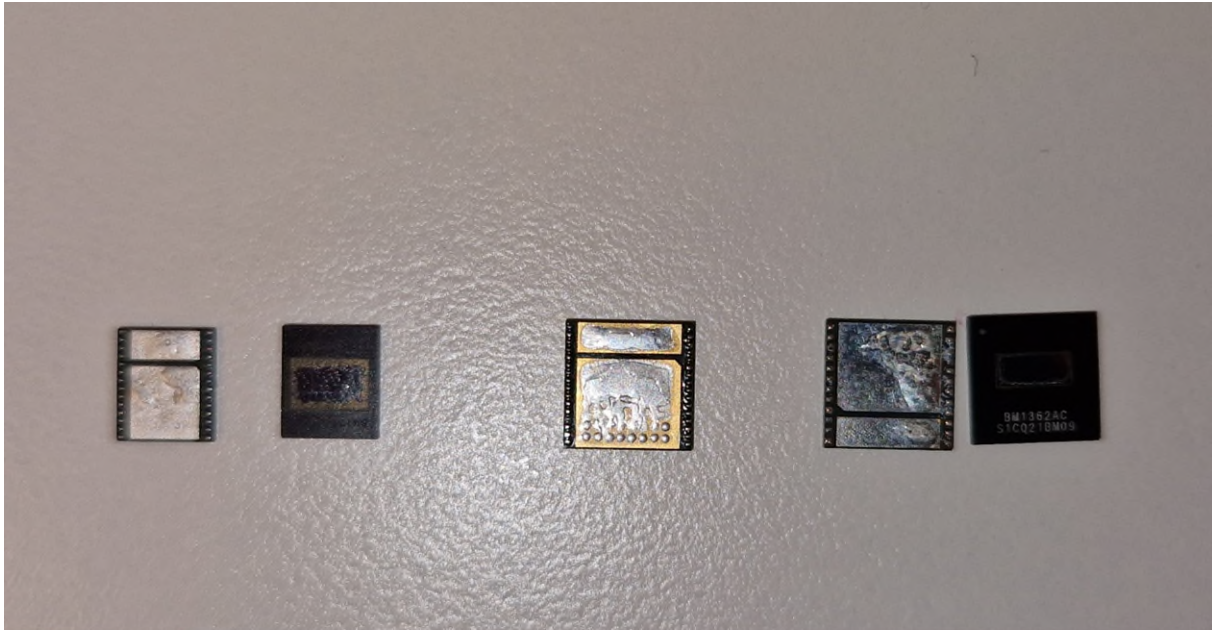
**Tabelle 25: POW-Hardwarekonfigurationen**

Miner	S19j pro	S19 XP	S19
Chip Typ	BM1362AC	BM1366AL	BM1398BB
Chip Größe	8 mm * 8 mm	7 mm * 6 mm	8 mm * 7,5 mm
Silizium Wafer Größe	7,5 mm * 7,5 mm	6,5 mm * 5,5 mm	7,5 mm * 7 mm
Die-Fläche	52,5 mm <sup>2</sup>	35,75 mm <sup>2</sup>	56,25 mm <sup>2</sup>
Anzahl Chips/Hashboards	126	110	76
Hashrate	104 Th/s	140 Th/s	95 TH/s
Anzahl Control Boards	1	1	1
Anzahl Hashboards	3	3	3
Gehäusegewicht	4 kg	n/A	5 kg
Anzahl Kühllüfter	4	4	4
Totalgewicht	17 kg	16 kg	16 kg
Leistung Netzteil	3068 W	3010 W	3250 W
Energieeffizienz von Hardware gemessen in J/TH	29,5	21,5	34,2
Einsatzdatum	01.07.2021	01.07.2022	01.05.2021
Quelle Chip Größe, Silizium Wafer Größe, und Die-Fläche	Messungen Swiss Economics (vgl. auch Abbildung unten)	Messungen Swiss Economics (vgl. auch Abbildung unten)	Messungen Swiss Economics (vgl. auch Abbildung unten)
Quelle der technischen Daten	<a href="https://d-central.tech/manuals/ant-miner-s19j-pro-maintenance-guide/">https://d-central.tech/manuals/ant-miner-s19j-pro-maintenance-guide/</a>	<a href="https://d-central.tech/manuals/ant-miner-s19-xp-maintenance-repair-guide/">https://d-central.tech/manuals/ant-miner-s19-xp-maintenance-repair-guide/</a>	<a href="https://d-central.tech/manuals/ant-miner-s19-maintenance-repair-guide/">https://d-central.tech/manuals/ant-miner-s19-maintenance-repair-guide/</a>

Quelle: Eigene Darstellung.

Die nachfolgende Abbildung präsentiert die drei Chips, deren Größe im Rahmen dieser Analyse gemessen wurde. Die eigenständige Abmessung war erforderlich, da Angaben über die Chipgröße und die Die-Fläche bei den Mining-Geräten im Allgemeinen nicht öffentlich verfügbar sind. Die Darstellung erfolgt von links nach rechts. Es handelt sich um die Modelle BM1366AL, welches zu den ASIC S19 XP passt, BM1398BB, welches zu den ASIC-Geräten S19 passt, sowie BM1362AC, welches zu den ASIC-Geräten S19j Pro passt.

**Abbildung 14: Abbildung der gemessenen Chips**



Quelle: Eigene Darstellung.

## A.2.2 Herstellungsphase

Zur Schätzung der Umweltauswirkungen der Herstellung von Mining-Hardware für das Bitcoin-Netzwerk wird die gleiche Methode wie für POS verwendet, die in Abschnitt A.1.2 beschrieben wird. Insbesondere werden, die vom UBA geschätzten Wirkungsfaktoren in die Berechnungen einbezogen. Allerdings wird die Größe der Die-s, die ein Input für die Berechnung ist, so angepasst, dass sie mit denen der in Abschnitt A.1.2 beschriebenen ASICs übereinstimmt.

### Quantifizierung der Berechnungsschritte

Im Folgenden werden die Schritte zur Berechnung von ADP, GWP und KEA pro Jahr für das Bitcoin-Netzwerk dargestellt.

Die Berechnungen werden mithilfe der in Abschnitt in A.1.2 beschriebenen Formeln durchgeführt und gehen in folgenden Schritten vor:

- ▶ **Schritt 1 ADP, GWP und KEA pro Hardware-Typ und über gesamte Nutzungsdauer:** Die Kennzahlen ADP, GWP, KEA werden für die in Anhang A.1.1 dargestellten Hardware-Typen getrennt (pro ASIC) berechnet. Hierbei wird jeweils die gesamte Nutzungsdauer berücksichtigt.
- ▶ **Schritt 2 Standardisierung auf ein Jahr:** Die in Schritt 1 berechneten Kennzahlen je Nutzungsdauer werden auf die Dauer eines Jahres standardisiert.

- ▶ **Schritt 3 Durchschnittliche Bitcoin-ASIC:** Aus den in Schritt 2 ermittelten Werten pro Hardware-Typ und Jahr wird ein Durchschnitt ermittelt. Dies ergibt den durchschnittlichen jährlichen ADP, GWP und KEA für ein repräsentatives Ethereum-Node.
- ▶ **Schritt 4 Bitcoin-Netzwerk:** Multiplikation der für einen durchschnittlichen Ethereum-Node berechneten ADP, GWP und KEA mit der Anzahl der aktiven ASICs über ein Jahr. Die Resultate dieses letzten Schrittes bestehen aus den folgenden Ergebnissen: geschätztes ADP, GWP und KEA pro Jahr für das Bitcoin-Netzwerk.

Die vier Schritte werden nachfolgend mit Zahlen erläutert:

### Schritt 1 ADP, GWP und KEA pro Hardware-Typ und über gesamte Nutzungsdauer:

Im ersten Schritt werden die KPIs ADP, GWP und KEA für jeden Hardware-Typ berechnet. Die Berechnung der verschiedenen KPIs für einen Hardware-Typ kann hierbei als Funktion aus Wirkungsfaktoren und Hardware spezifikation zusammengefasst werden:

$$KPI = f(\text{Wirkungsfaktoren}, \text{Hardware Spezifikation})$$

Die gleiche Methodik, wie zu Beginn dieses Abschnitts beschrieben, wird somit auf alle Hardware-Typen und alle KPIs angewandt. Die Formeln zur Berechnung von ADP, GWP und KEA unterscheiden sich somit untereinander nicht. Die Berechnungen liegen jeodch unterschiedliche Wirkungsfaktoren zugrunde. Da die Berechnung gleichzeitig jeweils für drei Hardware-Typen berechnet werden gibt es insgesamt neun Berechnungen (drei Hardwares, drei KPIs). Diese beruhen auf folgender Formel (siehe auch oben):

$$\begin{aligned} \text{Hardware}_{i,WK} &= \text{CPU}_{i,WK} + \text{Kühlkörper}_{i,WK} + \text{RAM Module}_{i,WK} + \text{SSD}_{i,WK} \\ &+ \text{Motherboard}_{i,WK} + \text{Assembly}_{i,WK} + \text{Rack Rest}_{i,WK} + \text{PSU}_{i,WK} \end{aligned}$$

Die Annahmen bzgl. Hardware-Spezifikation befinden sich in Tabelle 25. Die Wirkungsfaktoren sind vorgängigen UBA-Studien entnommen (UBA (2021)):

Zur Illustration werden im Folgenden die Berechnungen für den KPI ADP der S19j Pro („Hardware 2“) vorgestellt:

$$\begin{aligned} \text{Hardware}_{S19,ADP} &= \text{CPU}_{S19,ADP} + \text{Kühlkörper}_{S19,ADP} + \text{RAM Module}_{S19,ADP} + \text{SSD}_{S19,ADP} \\ &+ \text{Motherboard}_{S19,ADP} + \text{Assembly}_{S19,ADP} + \text{Rack Rest}_{S19,ADP} + \text{PSU}_{S19,ADP} \end{aligned}$$

Die Formeln zur Berechnung der einzelnen Elemente (CPU<sub>S19j Pro,ADP</sub>, Kühlkörper<sub>S19j Pro,ADP</sub>, usw.) wurden bereits zuvor vorgestellt und werden hier nicht erneut kopiert.

Das Ergebnis des ersten Elements (CPU<sub>S19j Pro,ADP</sub>) ist im Folgenden detailliert aufgeführt:

$$\begin{aligned} \text{CPU}_{S19j \text{ Pro,ADP}} &= \text{Anzahl CPU} \times (\text{Die Fläche} \times \text{WF CPU} \times \text{Die Fläche}_{ADP} \\ &+ 0,36 \text{ g} \times \text{WF Gold}_{ADP} + \text{WF Transport}_{ADP}) \end{aligned}$$

Wobei,

- ▶ Anzahl CPU = 1
- ▶ Die – Fläche = 128,25 cm<sup>2</sup> (Tabelle 25: Fläche x Anzahl Chips)
- ▶ WF CPU Die-Fläche<sub>ADP</sub> = 0,00000058655 (UBA 2021)

- ▶  $0,36 \text{ g x WF Gold}_{ADP} = 0,019933849$  (UBA 2021)
- ▶  $\text{WF Transport}_{ADP} = 0,0000000432748$  (UBA 2021)

Die Anwendung der Formel führt zu folgendem Ergebnis:  $\text{CPU}_{S19pro,ADP} = 0.01993420$ .

Alle anderen Komponenten von S19j Pro lassen sich nach der gleichen Vorgehensweise unter Anwendung der in Abschnitt in A.1.2 beschriebenen Formeln berechnen (vgl. auch Fussnoten in Tabelle 26). Die Ergebnisse aller Komponenten von S19j Pro sind in der nächsten Tabelle dargestellt.

**Tabelle 26: Ergebnisse für S19j Pro**

	S19j Pro
CPUS19j Pro,ADP	0,020111
KühlkörperS19j Pro,ADP	0,00051112
RAM ModuleS19j Pro,ADP	0
SSDS19j Pro,ADP	0
MotherboardS19j Pro,ADP	0,0037113
AssemblyS19j Pro,ADP	0,0000014114
Rack RestS19j Pro,ADP	0,020115
PSUS19j Pro,ADP	0,017116
HardwareS19j Pro,ADP	0,061

Quelle: Eigene Berechnung.

$\text{Hardware}_{S19j Pro,GWP}$ ,  $\text{Hardware}_{S19j Pro,KEA}$  und die drei KPIs (ADP, GWP, KEA) für die S19 XP und S19 werden nach demselben Ansatz berechnet (aber mit unterschiedlichen Hardwarespezifikationen).

111  $\text{CPU}_{S19pro,ADP} = \text{Anzahl CPU} \times (\text{Die-Fläche} \times \text{WF CPU Die-Fläche}_{ADP} + 0,36 \text{ g x WF Gold}_{ADP} + \text{WF Transport}_{ADP}) = 1 \times (128,25 \times 5,87\text{E-}07 + 1,99\text{E-}02 + 4,33\text{E-}08) = 0,02$ . (vgl. Tabelle und UBA 2021).

112  $\text{KKS}_{S19pro,ADP} = \text{Anzahl CPU} \times \text{WF KKW} = 1 \times 5,10\text{E-}04 = 5,10\text{E-}04$  (vgl. Tabelle und UBA 2021).

113  $\text{Motherboard}_{S19pro,ADP} = 1 \times \text{Motherboard}_{WF} = 3,69\text{E-}03$  (vgl. UBA 2021).

114  $\text{Assembly}_{S19pro,ADP} = 1 \times \text{Assembly}_{WF} = 1,41\text{E-}06$  (vgl. UBA 2021).

115  $\text{Rack Rest}_{S19pro,ADP} = 1 \times \text{Rack Rest}_{WF} = 0,0202395$  (vgl. UBA 2021).

116  $\text{PSU}_{S19pro,ADP} = 1 \times \text{PSU}_{WF} \times 2 \text{ kg} = 0,0166$  (vgl. UBA 2021).

**Tabelle 27: KPIs für Hardware 1, 2 und 3**

	S19 XP	S19j Pro	S19
ADP	0,061	0,061	0,061
GWP	512,9	671,8	533,2
KEA	7.096,2	9.232,4	7.368,9

Quelle: Eigene Berechnung.

**Schritt 2 Standardisierung auf ein Jahr:**

Nach der Berechnung für die gesamte Nutzungsdauer eines ASIC-Typen, werden die drei KPIs auf ein Jahr standardisiert. D.h. die Ergebnisse für jeden ASIC-Typ werden durch ihre jeweilige Nutzungsjahre dividiert. Es wird hierbei eine Nutzungsdauer von zwei Jahren angenommen.

**Tabelle 28: KPIs für Hardware 1, 2 und 3 pro Jahr**

	S19 XP	S19j Pro	S19
ADP pro Jahr	0,031	0,031	0,031
GWP pro Jahr	256,5	335,9	266,6
KSA pro Jahr	3.548,1	4.616,2	3'684,5

Quelle: Eigene Berechnung.

**Schritt 3 Durchschnittliche ASIC:**

Im nächsten Schritt wird ein gewichteter Durchschnitt des ADP, GWP und KEA pro Jahr für die drei ASICs berechnet. Es wird also ein repräsentativer ASIC gebildet. Die Gewichte der drei ASIC-Typen werden hierbei über Schätzung von Coinmetrics (Helmy et al. 2023) ermittelt.

Im Dezember 2023 hatten die drei meist genutzten ASICs einen Anteil von insgesamt 71% an der gesamten Hashrate des Netzwerks. Davon fiel 26% auf den S19, 29% auf den S19j Pro und 15% auf den S19 XP. Zwecks Vereinfachung wird davon ausgegangen, dass die drei ASICs den ganzen Markt bedienen, d.h. die Anteile sind so gewichtet, dass sie in Summe 100% ergeben (d.h. Anteil S19: 37%; S19j Pro: 41%; S19 XP: 22%).

Das Ergebnis für ADP wird zur Illustration wiederum dargestellt:

$$\begin{aligned}
 & \text{Durchschnitt ADP pro Jahr und pro ASIC} \\
 & = 22\% \times \text{Hardware}_{S19 \text{ xp, ADP}} \text{ pro Jahr} \\
 & + 41\% \times \text{Hardware}_{S19j \text{ pro, ADP}} \text{ pro Jahr} + 37\% \times \text{Hardware}_{S19, ADP} \text{ pro Jahr}
 \end{aligned}$$

Wobei,

- ▶  $\text{Hardware}_{S19 \text{ xp, ADP}} \text{ pro Jahr} = 0,031$
- ▶  $\text{Hardware}_{S19j \text{ pro, ADP}} \text{ pro Jahr} = 0,031$
- ▶  $\text{Hardware}_{S19, ADP} \text{ pro Jahr} = 0,031$

Dies ergibt ein durchschnittliches ADP von 0,031. Vorliegend unterscheiden sich die ADP praktisch nicht zwischen den Geräten, weshalb das Ergebnis dem einfachen Durchschnitt entspricht.

Auf diese Weise werden ebenfalls der durchschnittliche KPI für GWP und KEA pro Jahr und pro ASIC berechnet.:

- ▶ Durchschnittliches geschätztes ADP pro Jahr und pro ASIC: 0,031
- ▶ Durchschnittliches geschätztes GWP pro Jahr und pro ASIC: 293,0
- ▶ Durchschnittliches geschätztes KEA pro Jahr und pro ASIC: 4039,3

#### Schritt 4 Bitcoin-Netzwerk:

Im letzten Schritt werden diese drei Durchschnittswerte mit der geschätzten Anzahl der aktiven ASICs im Bitcoin-Netzwerk multipliziert (5'223'971 per 1.1.2024). Das Ergebnis ist eine Schätzung von ADP, GWP und KEA pro Jahr der Herstellungsphase für das Ethereum Netzwerk:

- ▶ Durchschnittliches geschätztes ADP pro Jahr: 159'496
- ▶ Durchschnittliches geschätztes GWP pro Jahr: 1'530'554'519
- ▶ Durchschnittliches geschätztes KEA pro Jahr: 21'101'207'611

Diese Ergebnisse sind in Tabelle 10 als Resultate wiedergegeben.

### A.2.3 Nutzungsphase

Wie für das Ethereum-Netzwerk werden auch für die Modellierung der Nutzungsphase des Bitcoin-Netzwerks die CCRI-Studie und die CCAF-Methodenbeschreibung verwendet. Im Folgenden wird kurz erläutert, wie genau die Berechnung durchgeführt wurde.

Der annualisierte Stromverbrauch wird anhand der folgenden Gleichung geschätzt:

$$E_{BTC,d} = \psi_d \times H_d \times PUE \times 60 \text{ s} \times 60 \text{ min} \times 24 \text{ h} \times 365,25 \text{ Tage}$$

Wobei,

- ▶  $\psi_d \times H_d \times PUE = D_{BTC,d}$
- ▶  $\psi_d$ : Gewichtete durchschnittliche Energieeffizienz von Mining-Hardware (vgl. Berechnung unten)
- ▶  $H_d$ : Durchschnittliche Bitcoin-Netzwerk-Hashrate an einem bestimmten Tag  $d$ , gemessen in TH/s, (vgl. Blockchain.com 2023).
- ▶  $PUE$ : Effektivität der Energienutzung (vgl. CCAF 2023a)

Es wird ein PUE-Wert von 1,10 angenommen, beruhend auf den Annahmen des CCAF. Wie vom CCAF erwähnt, ist diese Zahl konservativer als die in anderen Studien angenommene.

$\psi_d$  wird hierbei wie folgt berechnet:

$$\psi_d = \eta_i \times w_{i,d}$$

Wobei,

- ▶  $\eta_i$ : Energieeffizienz von Mining-Hardware  $i$
- ▶  $w_{i,d}$ : Anteil der Mining-Hardware  $i$  an allen Mining-Hardwares am Tag  $d$ <sup>117</sup>

$w_{i,d}$  wird wie folgt berechnet:

$$w_{i,d} = \frac{W_{i,d}}{\sum_{i=1}^N W_{i,d}}$$

Wobei,

- ▶  $W_{i,d}$ : Gewichtungsfaktor  $W$  von Mining-Hardware  $i$  am Tag  $d$

Je nach Einsatzdatum einer Mining-Hardware wird ihrem Gewichtungsfaktor ein Wert zwischen 1 und 0 zugewiesen. Modelle, deren Einsatzdatum fünf oder mehr Jahre zurückliegt oder deren Einsatzdatum in der Zukunft liegt, erhalten den Wert 0:

$$W_{i,d}(M_i) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } 0 \leq M < 12 \\ 0,8 & \text{wenn } 12 \leq M < 24 \\ 0,6 & \text{wenn } 24 \leq M < 36 \\ 0,4 & \text{wenn } 36 \leq M < 48 \\ 0,2 & \text{wenn } 48 \leq M < 60 \\ 0, & \text{wenn } 60 \leq M \vee M < 0 \end{cases}$$

$M_i$  ist die Differenz zwischen einem bestimmten Datum und dem Einsatzdatum von Mining-Hardware  $i$  (in Monaten).

#### Quantifizierung der Berechnungsschritte

Die Berechnungen folgen den folgenden fünf Schritten:

- ▶ Schritt 1: Berechnung der durchschnittlichen Leistung des Bitcoin-Netzwerks  $D_{BTC,d}$  (J/s)
- ▶ Schritt 2: Berechnung des annualisierten Stromverbrauchs  $E_{BTC,d}$  (J/a)
- ▶ Schritt 3: Berechnung der Ergebnisse in verschiedenen Maßeinheiten
- ▶ Schritt 4: Anpassung an den Primärenergiefaktor des deutschen Strommixes
- ▶ Schritt 5: Berechnung der CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen

#### Schritt 1: Durchschnittliche Energieeffizienz $\psi_d$ in J/TH

Im ersten Schritt berechnen wir die durchschnittliche Energieeffizienz der drei analysierten ASICs. Dazu gewichten wir die Energieeffizienz jedes ASICs nach dem Einsatzdatum der Mining-Hardware (Tabelle 25). Die berechneten Energieeffizienzen sind:

- ▶ S19j Pro: 29,5 J/TH
- ▶ S19 XP: 21,5 J/TH
- ▶ S19: 34,2 J/TH

<sup>117</sup> Im Gegensatz zum CCAF gehen wir hier von der Annahme aus, dass die Menge der Hardwares fix ist und ihr Anteil an der Menge nicht täglich schwankt.

Die Gewichte für jedes Modell lauten:

- ▶ S19j Pro (Einsatzdatum: 01.07.2021): 33,33%
- ▶ S19 XP (Einsatzdatum: 01.07.2022) : 44,44%
- ▶ S19 (Einsatzdatum: 01.05.2020) : 22,22%

Die durchschnittliche Energieeffizienz beträgt somit:

$$29,5 \times 33\% + 21,5 \times 44\% + 34,2 \times 22\% = 27 \text{ J/TH } (\psi_d)$$

### Schritt 2: Durchschnittliche Leistung am Tag $d$ , $D_{BTC,d}$ (J/s)

Die durchschnittliche Leistung berechnet sich folgendermaßen:

$$\psi_d \times H_d \times PUE, \text{ wobei}$$

- ▶  $\psi_d$ : Gewichtete durchschnittliche Energieeffizienz von Mining-Hardware am Tag  $d$  (vgl. CCAF 2023a) = 27 J/TH
- ▶  $H_d$ : Durchschnittliche Bitcoin-Netzwerk-Hashrate an einem bestimmten Tag  $d$ , gemessen in TH/s, (vgl. blockchain.com 2023) = 554.813.968,25 TH/s
- ▶  $PUE$ : Effektivität der Energienutzung (vgl. CCAF 2023a) = 1,1

Damit ergibt sich:

$$D_{BTC,d} = 27 \times 554.813.968,25 \times 1,1 = 16.471.193,797 \text{ J/s}$$

### Schritt 3: Annualisierte Stromverbrauch, $E_{BTC,d}$ (J/a)

Der annualisierte Stromverbrauch  $E_{BTC,d}$  wird berechnet, indem die durchschnittliche Leistung am Tag  $d$   $D_{BTC,d}$  mit 365,25 (Tage), 24 (Stunden), 60 (Minuten) und 60 (Sekunden) multipliziert wird:

$$E_{BTC,d} = D_{BTC,d} \times 365,25 \times 24 \times 60 \times 60 = 519.791.345.379.580.000 \text{ J/a}$$

### Schritt 4: Berechnung der Ergebnisse in verschiedenen Maßeinheiten

Der jährliche Stromverbrauch aus Schritt 3 wird in MJ und kWh ausgedrückt bzw. umgerechnet:

- ▶ 519.791.345.380 MJ/a
- ▶ 144.386.484.828 kWh/a

### Schritt 5: Anpassung an den Primärenergiefaktor des deutschen Strommixes

Der in Kilowattstunden ausgedrückte jährliche Stromverbrauch (144.386.484.828 kWh) wird anschließend an den Primärenergiefaktor des deutschen Strommixes angepasst, um den Primärenergiebedarf zu berechnen:

$$144.386.484.828 \text{ kWh} \times 10,7 \text{ MJ/kWh} = 1.544.935.387.656 \text{ MJ/a}$$

### CO<sub>2</sub> eq.-Emissionsberechnung

Die CO<sub>2</sub> eq-Emissionen werden auf 73.162.272.346 kg CO<sub>2</sub> eq./a. geschätzt (siehe Tabelle 10).

Sie werden berechnet, indem die Emissionsintensität am 1.1.2024 von 0,50671 kg CO<sub>2</sub> eq./kWh<sup>118</sup> mit den in kWh ausgedrückten Stromverbrauchsberechnungen (144.386.484.828 kWh) multipliziert wird. Die Formeln sind weiter oben in diesem Abschnitt dargestellt.

### A.3 Lokale Energiemärkte

#### A.3.1 Modellierung des Netzwerkes

Das Netzwerk besteht aus 37 Raspberry Pi 3 Model B mit identischer Ausstattung. Diese befinden sich in einem lokalen Netzwerk (Quartierstrom 2023).

Das Raspberry Pi 3 Model B weist hierbei folgende technischen Werte aus:

**Tabelle 29: Lokale Energiemärkte Hardwarekonfigurationen**

	Raspberry Pi 3 Model B
CPU	1x ARMv8
Cores/Threads	4/4
Architektur	x86/x64
RAM	1 GB
Speicher	—
GPU	—
PSU	—
Gehäuse	integriert
Operationssystem	Debian GNU/Linux

Quelle: Offizielle Angaben von der Webseite von Raspberry Pi.

#### A.3.2 Herstellungsphase

Zur Schätzung der Umweltauswirkungen der Herstellung der Raspberry Pi 3, die für den Betrieb des Tendermint-basierten Netzwerkes genutzt wurden, wird die gleiche Methode wie für POS verwendet, die in Abschnitt A.1.2 beschrieben wird.

Die Berechnung vereinfacht sich hierbei insofern, dass das Netzwerk klarer definiert werden kann und nicht aus verschiedenen Hardware-Typen besteht. Zudem benötigt die Hardware keine eigenständige SSD, HDD oder Netzteile.

Die Vorgehensweise unterscheidet sich im Vergleich zur Berechnung des Ethereum-Netzwerkes somit nur in der Hardware-Spezifikation und der Anzahl Geräte. Die Berechnung erfolgt entsprechend analog der Beschreibung in Abschnitt A.1.2 und wird hier nicht erneut dargestellt.

118 Die Emissionsintensität wird von der Website des CCAF bezogen: <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci/ghg>.

### Quantifizierung der Berechnungsschritte

Die Berechnungen werden analog derjenigen bei Ethereum durchgeführt, wobei Schritt 3 (durchschnittlicher Node) wegfällt, da das Netzwerk aus identischen Geräten besteht.

Die Berechnungen enthalten somit die folgenden Schritte:

- ▶ **Schritt 1 ADP, GWP und KEA für ein Raspberry Pi 3 Model B und über gesamte Nutzungsdauer:** Die Kennzahlen ADP, GWP und KEA wird für ein Raspberry Pi 3 Model B berechnet. Hierbei wird jeweils die gesamte Nutzungsdauer berücksichtigt.
- ▶ **Schritt 2 Standardisierung auf ein Jahr:** Die in Schritt 1 berechneten Kennzahlen je Nutzungsdauer werden auf die Dauer eines Jahres standardisiert.
- ▶ **Schritt 3 Lokales Energiemarkt-Netzwerk:** Multiplikation der für den Raspberry Pi berechneten ADP, GWP und KEA mit der Anzahl der Raspberry Pi über ein Jahr.

#### Schritt 1 ADP, GWP und KEA pro Hardware-Typ und über gesamte Nutzungsdauer:

Analog Abschnitt A.1.2 (Ethereum) wird hier die Berechnung bzw. die Werte für ADP illustriert bzw. wiedergegeben.

**Tabelle 30: Ergebnisse für Raspberry Pi<sub>ADP</sub>**

	ADP-Ergebnisse
CPUADP	0,02119
KühlkörperADP	0,00051120
RAM ModuleADP	0,0017121
SSDADP	—
MotherboardADP	0,0037122
AssemblyADP	0,0000014123
Rack RestADP	0,020124
PSUADP	0,017125
<b>HardwareADP</b>	<b>0.063</b>

Quelle: Eigene Berechnung.

$$119 \text{ CPU}_{2,ADP} = \text{Anzahl CPU} \times (\text{Die-Fläche} \times \text{WF CPU Die-FlächeADP} + 0,36 \text{ g} \times \text{WF GoldADP} + \text{WF TransportADP}) = 1 \times (1,47 \times 5,87\text{E-}07 + 1,99\text{E-}02 + 4,33\text{E-}08) = 0,02. \text{ (vgl. Tabelle 29 und UBA 2021).}$$

$$120 \text{ KK}_{WK} = \text{Anzahl CPU} \times \text{WF KK}_{WK} = 1 \times 0,00051 = 0,00051 \text{ (Tabelle 29 und UBA 2021).}$$

$$121 \text{ RAM Module}_{2,ADP} = \text{Anzahl RAM Module} \times (\text{GByteRAM} / \text{RAMproDie} \times \text{WF RAM Die-FlächeWK} + 29,35 \text{ mg} \times \text{WF RAM GoldWK} + \text{WF RAM PCBWK} + \text{WF RAM TransportWK}) = 1 \times (1 / 1,875 * 6,30\text{E-}05 + 1,63\text{E-}03 + 6,23\text{E-}05 + 3,75\text{E-}07) = 1,73\text{E-}03 \text{ (vgl. Tabelle 29 und UBA 2021).}$$

$$122 \text{ Motherboard}_{2,ADP} = 1 \times \text{MotherboardWF} = 3,69\text{E-}03 \text{ (vgl. UBA 2021).}$$

$$123 \text{ Assembly}_{2,ADP} = 1 \times \text{AssemblyWF} = 1,41\text{E-}06 \text{ (vgl. UBA 2021).}$$

$$124 \text{ Rack Rest}_{2,ADP} = 1 \times \text{Rack RestWF} = 0,0202395 \text{ (vgl. UBA 2021).}$$

$$125 \text{ PSU}_{2,ADP} = 1 \times \text{PSUWF} * 2 \text{ kg} = 0,0166 \text{ (vgl. UBA 2021).}$$

### Schritt 2 Standardisierung auf ein Jahr:

Es wird eine Nutzungsdauer von 3 Jahren angenommen. Entsprechend wird das Resultat aus Tabelle 17 um 3 Jahre dividiert. Es resultiert ein Wert von 0.021.

### Schritt 3: Lokales Energie-Netzwerk

Das Netzwerk besteht aus 37 Raspberry Pi's. Das Gesamtergebnis für ADP entspricht somit dem Resultat aus Schritt 2 multipliziert mit 37, was dem Wert in Tabelle 12 entspricht.

### A.3.3 Nutzungsphase

Um die Nutzungsphase des lokalen Energiemarkts zu modellieren, verwenden wir die dokumentierten Zahlen aus Meeuw et al. (2020). Dort wird festgehalten, dass der implementierte Energiemarkt eine maximale Transaktionsrate von 10,5 Transaktionen pro Sekunde erreicht (tps). Dieses Maximum entsteht durch die begrenzte Rechenkapazität eines Raspberry Pi 3. Messungen zufolge verbraucht ein Raspberry Pi 3 Model B unter Vollast – also, wenn das Maximum der Anzahl Transaktionen erreicht wird – ungefähr 3,6 J/s. Wir können somit einen Bezug herstellen zwischen der Anzahl Transaktionen und dem Stromverbrauch einer einzelnen Node (einem einzelnen Raspberry Pi 3) im Netzwerk.

Wir nehmen an, dass der Stromverbrauch eine lineare Funktion der Anzahl Transaktionen ist, sodass der Stromverbrauch des gesamten Tendermint-Netzwerks wie folgt berechnet werden kann:

$$E_{TE,d} = D_{TE,d} \times 60 \times 60 \times 24 \times 365,25.$$

Wobei  $D_{T,d}$  dem Elektrizitätsverbrauch pro Sekunde und pro Transaktion auf dem Tendermint-Protokoll am Tag  $d$  entspricht und berechnet wird wie folgt:

$$D_{TE,d} = N$$

Wobei  $N$  der Anzahl Nodes im Netzwerk entspricht.

In einem zweiten Schritt werden sodann die Emissionen des berechneten Stromverbrauchs geschätzt. Wir folgen hierbei der oben beschriebenen Methodologie zu POS-Blockchains und verwenden die Daten des CCAF. Wir multiplizieren den zuvor berechneten Stromverbrauch ( $E_{TE,d}$ ) mit einem Emissionsfaktor in g CO<sub>2</sub> eq./kWh.

Die Formel zur Berechnung der jährlichen Treibhausgasemissionen lautet wie folgt:

$$G_{TE,d} = I_{TE,d} \times E_{TE,d}$$

Wobei,

- ▶  $I_{TE,d}$ : Emissionsintensität am Tag  $d$ , gemessen in g CO<sub>2</sub> eq./kWh
- ▶  $E_{TE,d}$ : Annualisierter Tendermint-Stromverbrauch am Tag  $d$  (siehe vorherige Absätze)

Die geschätzte Emissionsintensität wird vom CCAF zur Verfügung gestellt. Die Berechnungen in diesem Bericht stützen sich ebenfalls auf diese Schätzung.

Die CCAF verwendet für die Schätzung der Emissionsintensität folgenden zwei Inputs:

- ▶ Anteil der Energieträger am weltweiten Strommix am Tag  $d$ .
- ▶ Äquivalente Emissionen der Energiequelle  $s$ , gemessen in g CO<sub>2</sub> eq./kWh.

Wir verwenden hierbei zunächst den Emissionsfaktor der Schweiz, da die untersuchte Anwendung zu lokalen Energiemärkten in der Schweiz betrieben wurde. Zusätzlich weisen wir auch die Ergebnisse basierend auf dem Emissionsfaktor für Deutschland aus.

#### Quantifizierung der Berechnungsschritte

##### Schritt 1: Durchschnittliche Leistung des Netzwerks $D_{TE,d}$ (J/s)

Unter Volllast wird eine Leistung von 3,6 J/s pr Node angenommen (Eco Energy Geek, 2022).

Mit einer Grösse des Netzwerks von 37 Nodes entspricht dies 133 J/s.

##### Schritt 2: Annualisierter Stromverbrauch $E_{ETH,d}$ (MJ/a)

$$E_{TE,d} = D_{TE,d} \times 60 \text{ s} \times 60 \text{ min} \times 24 \text{ h} \times 365,25 \text{ Tage} = 4.203.472.320 \text{ J/a}$$

##### Schritt 3 Berechnung der Ergebnisse in verschiedenen Maßeinheiten

Der jährliche Stromverbrauch aus Schritt 2 wird in MJ und GWh ausgedrückt bzw. umgerechnet:

- ▶ 4.203 MJ/a
- ▶ 1'167.63 kWh/a

##### Schritt 4: Anpassung an den Primärenergiefaktor des deutschen Strommixes

Der in Kilowattstunden ausgedrückte jährliche Stromverbrauch wird anschließend an den Primärenergiefaktor des deutschen Strommixes angepasst, um den Primärenergiebedarf zu berechnen:

$$1.167,63 \text{ kWh/a} \times 10,7 \text{ MJ/kWh} = 12.494 \text{ MJ/a}$$

##### Schritt 5: CO<sub>2</sub> eq.-Emissionsberechnung

Die Emissionen werden auf 64 kg CO<sub>2</sub> eq./a geschätzt (siehe Tabelle 12). Sie werden berechnet, indem die Emissionsintensität der Schweiz von 54,7 kg CO<sub>2</sub> eq./kWh mit den in kWh ausgedrückten Stromverbrauchsberechnungen multipliziert wird.<sup>126</sup>

126 Vgl. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fragen-antworten.html> (28.11.2024.)

Die Emissionsintensität für Deutschland von 0,44912 CO<sub>2</sub> eq./kWh mit der zusätzlich die Emission pro Transaktion für Deutschland berechnet wird,<sup>127</sup> beruht auf Schätzungen des CCAF. Diese stützt sich auf den Strommix in den einzelnen Ländern und Regionen (v.a. Ritchie et al. 2024) sowie auf Berechnungen der Association of Issuing Bodies.

## A.4 Digitaler Green Bond

Die Berechnung der Umweltwirkungen des Green Bonds beruht vollständig auf den Berechnungen der Umweltwirkungen von Anwendungen des Ethereum-Netzwerkes.

### A.4.1 Modellierung des Netzwerkes

Der digitale Green Bond wird auf dem Ethereum-Netzwerk gehandelt. Entsprechend wird vom gleichen Netzwerk wie in Abschnitt A.1.1 ausgegangen.

### A.4.2 Herstellungsphase

Der digitale Green Bond wird auf dem Ethereum-Netzwerk gehandelt und erfordert daher die gleiche Hardware wie Ethereum-Transaktionen. Folglich stellen wir auf die Umweltwirkungen des Netzwerks ab, die wir bereits in Abschnitt A.1.2 ermittelt haben. Es stellt sich danach die Frage, welcher Anteil der Umweltwirkungen des gesamten Netzwerks ausschliesslich auf den Handel (von Green Bonds) fällt.

Um dies schätzen zu können, werden die Gas-Einheiten von Ethereum verwendet. Diese gelten bei Ethereum als Recheneinheiten, mit welchen die Netzwerk-Nutzungskosten berechnet werden können. Im ersten Schritt wird in dieser Analyse die Umweltwirkung pro Gas-Einheit ermittelt. Daraus können die KPIs für eine Recheneinheit von Ethereum geschätzt werden. Anschließend wird die Anzahl der erforderlichen Gas-Einheiten für den Handel mit Green Bonds berechnet. Das Resultat folgt aus der Multiplikation der beiden ermittelten Werten.

#### Quantifizierung der Berechnungsschritte

Die Berechnung wird für ADP illustriert und ist identisch für die anderen KPIs

► Schritt 1: KPI je Gas-Einheit

ADP des Ethereum Netzwerks: 294 kg Sq. eq./a (vgl. Tabelle 11)

Gas-Einheiten des Ethereum-Netzwerks 2023: 39 Billionen Gas-Einheiten (Glassnode 2024).

ADP pro Gas-Einheit: 294 kg Sq. eq./a dividiert durch 39 Billionen Gas-Einheiten = 7,54E-12 kg Sb. eq./a

► Schritt 2: Gas-Einheiten eines Handels

Ein getätigter Handel auf Uniswap kostet ca. 170.000 Ethereum-Gas Einheit (vgl. auch Ethereum.org 2023b).

---

<sup>127</sup> Die Emissionsintensität wird von der Website des CCAF bezogen. Siehe insbesondere die Abbildung 3 hier: <https://ccaf.io/cbsi/ethereum/ghg/methodology>. (05.11.2024).

► Schritt 4: Ermittlung ADP für den Handel

$ADP \text{ pro Handel} = 7,54E-12 \text{ kg Sb. eq./a} * 170.000 \text{ Ethereum Gas-Einheiten} = 1,28E-06.$

Wie in Tabelle 13 ausgewiesen, hat ein Handel auf dem Ethereum-Netzwerk somit ca. 0,000001 Sb. eq./a zur Folge.

#### A.4.3 Nutzungsphase

Die Nutzungsphase wird gem. der gleichen Logik und denselben Gas-Einheiten ermittelt.

#### A.5 Limitationen der Methodik

Die Umweltbewertung der DLT-Lösungen weist gewisse Limitationen auf, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden sollten. Allgemein gilt, dass die Berechnungen von öffentlich zugänglichen Daten und Schätzungen abhängen, die nicht immer die aktuellsten technologischen Entwicklungen widerspiegeln. Beispielsweise sind die Annahmen zur Lebensdauer und Recyclingquote der Hardware, insbesondere bei der Elektroschrottberechnung, mit Unsicherheiten behaftet, da diese auf generischen Modellen und nicht auf spezifischen Marktbedingungen basieren. Dies ist insbesondere bei unseren Berechnungen zu den Umweltauswirkungen lokaler Energiemärkte der Fall, da wir uns hier auf eine konkrete Beispielanwendung konzentrieren, die möglicherweise nicht repräsentativ ist.

Beachtet werden sollte auch, dass die Berechnung der CO<sub>2</sub> eq.-Emissionen auf einem globalen Strommix basiert, der regionale Unterschiede und zeitliche Veränderungen nicht vollständig berücksichtigen kann. Diese Annahme könnte die tatsächlichen Emissionen verzerren, da der Strommix und die damit verbundenen Emissionen je nach Standort der Nodes erheblich variieren können. Wir nutzen darüber hinaus in unseren Berechnungen mehrfach das Green Cloud Computing-Tool, welches ursprünglich für andere Anwendungsfälle entwickelt wurde und möglicherweise nicht alle spezifischen Aspekte von DLT-Netzwerken erfasst.

Bei der Modellierung des Ethereum-Netzwerks (POS) werden zudem Durchschnittswerte für Hardwarekonfigurationen verwendet, die die Variabilität in der tatsächlichen Nutzung und Effizienz der Validator-Hardware nicht vollständig abbilden. Insbesondere können Unterschiede in der Leistung und im Energieverbrauch zwischen verschiedenen Clients und Hardwarevarianten nicht exakt erfasst werden. Dies könnte zu Abweichungen in den geschätzten Umweltwirkungen führen. Bei der Bewertung von POW-Blockchains wie Bitcoin hingegen können die pauschalen Werte für ASIC-Modelle und deren geografische Verteilung zu Ungenauigkeiten führen. Außerdem sind die von den Herstellern angegebenen Spezifikationen zur Leistung der Hardware nicht immer exakt, was sich auf die Ergebnisse auswirken kann.

Schließlich bleibt der Vergleich mit traditionellen Systemen wie PayPal und der Schweizer Börse teilweise problematisch, da diese Systeme unterschiedliche Strukturen und Prozesse aufweisen, die nicht immer direkt mit DLT-basierten Systemen vergleichbar sind. Der Vergleich vernachlässigt möglicherweise indirekte Effekte und Unterschiede in der Infrastruktur, was die Aussagekraft der Ergebnisse einschränkt. Die öffentlich verfügbaren Informationen schränken hierbei ein, wie detailliert diese Vergleiche gemacht werden können.

Außerdem sollten die vom CCAF genannten Limitationen, auf denen unsere Nutzungsphasenberechnungen beruhen, ebenfalls berücksichtigt werden:

- ▶ Die durchschnittliche marginale elektrische Leistung von Konsens- und Ausführungs-Clients wurde separat gemessen und dann kombiniert. CCRI (2022) fand heraus, dass der Stromverbrauch bei gleichzeitiger Ausführung von Prysm und Geth um 9% niedriger war, aber 12% weniger Transaktionen verarbeitet wurden, was den geringeren Verbrauch erklären könnte.
- ▶ Die Tests zur Schätzung der elektrischen Leistung wurden mit spezifischen Software-Versionen durchgeführt. Da sich diese Versionen über die Zeit ändern, kann dies die Stromnachfrage beeinflussen. Die Verteilung der Konsens-Clients basiert auf täglichen Daten, während die Verteilung der Ausführung-Clients als konstant angenommen wird.
- ▶ „Nodes“ bezieht sich auf Beacon Nodes mit mindestens einem Konsens- und einem Ausführungs-Client. Ein Validator-Client kann unabhängig betrieben werden, was jedoch Nachteile mit sich bringt und zu einer Unterschätzung der Gesamtanzahl der Nodes führen kann.
- ▶ Neue und effizientere Hardware, die noch nicht auf dem Markt ist, könnte unbekannt sein. Hersteller könnten proprietäre Geräte zu ihrem eigenen Vorteil nutzen, bevor sie öffentlich verfügbar sind.

## B Anhang: SWOT-Analyse

### B.1 Bitcoin

Die untenstehende Abbildung 15 veranschaulicht die Ergebnisse unserer SWOT-Analyse der POW Blockchains. Die Erläuterungen zu diesen Ergebnissen stehen nach der Abbildung.

**Abbildung 15: SWOT-Analyse Ergebnisse von POW-Blockchains**

Strengths	Weaknesses
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vertrauen</li> <li>• Finanzielle Inklusion</li> <li>• Schnelle und kostengünstige Überweisungen</li> <li>• Anonymität (sehr hoch)</li> <li>• Keine Zwischenhändler</li> <li>• Kein Datenverlust/Manipulation/Fälschung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volatilität (einschließlich Spekulation)</li> <li>• Sehr energieintensiv</li> <li>• Kein Kontakt im Falle des Verlusts von Zugangsdaten</li> <li>• Mangelnde Skalierbarkeit</li> <li>• Benutzerfreundlichkeit</li> </ul>
Opportunities	Threats
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbesserte digitale Kompetenz</li> <li>• Wachsender Bedarf an Finanztransaktionen außerhalb von Institutionen</li> <li>• Führende Nationen und globale Wirtschaften planen, stark in Technologie zu investieren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regulatorische Hürden</li> <li>• hohe Ressourceninanspruchnahme</li> <li>• grosser Energieverbrauch</li> <li>• Verbrechensdelikte im Cyberspace</li> <li>• Zurückhaltung gegenüber neuer Technologie</li> </ul>

Quelle: Eigene Darstellung.

Als eine erste zentrale Stärke von POW-Blockchains ist das Vertrauen zu nennen. Die Blockchain verspricht ein manipulationsfreies System und schafft damit mehr Vertrauen in die Finanzstabilität dieser Produkte (Gatteschi et al. 2018). Es ist auch kein Vertrauen in Zwischenhändler nötig, da diese nicht einmal gebraucht werden. Des Weiteren ermöglicht sie eine finanzielle Inklusion, indem sie Menschen in Regionen mit begrenztem Bankenzugang den Zugang zu Finanzdienstleistungen erleichtert. Dies könnte beispielsweise aufgrund von fehlender Identifikation der Fall sein. Das Problem der fehlenden Identifikation wird durch die Technologie gelöst, da sie sogar Pseudonymität verspricht (Mirzayi & Mehrzad 2017). Zusätzlich attraktiv ist die Möglichkeit für schnelle und kostengünstige Überweisungen.

Es sind jedoch auch einige Schwächen zu beachten. Ein wesentlicher Aspekt ist der hohe Energieaufwand, der mit dem Betrieb von Bitcoin verbunden ist (Gatteschi et al. 2018). Zudem könnte der Verlust von Zugangsdaten zu einem Problem werden, da es keine zentrale Behörde gibt, die im Falle eines solchen Verlusts zu Hilfe gezogen werden könnte. Die mangelnde Skalierbarkeit und Benutzerfreundlichkeitsprobleme sind ebenfalls zu beachten.

Bitcoin als Transaktionsnetzwerk bieten sich auch zahlreiche Chancen. Die Verbesserung der digitalen Kompetenz der Bevölkerung führt zu einer steigenden Akzeptanz und Nutzung digitaler Zahlungsdienste. Der wachsende Bedarf an Finanztransaktionen außerhalb von traditionellen Institutionen eröffnet zudem neue Marktchancen. Darüber hinaus planen führende Nationen und globale Wirtschaften, stark in Technologie zu investieren, was die Entwicklung, Akzeptanz und Verbreitung weiter vorantreiben könnte.

Zu den vorherrschenden Bedrohungen für die Technologie zählen regulatorische Hürden, welche die Nutzung einschränken könnten. Die hohe Ressourceninanspruchnahme und Energieverbrauch und die damit verbundene Kritik könnten zu weiteren regulatorischen Einschränkungen führen (Gatteschi et al. 2018). Des Weiteren stellen Verbrechensdelikte im Cyberspace sowie die allgemeine Zurückhaltung gegenüber neuen Technologien potenzielle Bedrohungen dar.

## B.2 Ethereum

Die untenstehende Abbildung 16 veranschaulicht die Ergebnisse unserer SWOT-Analyse der POS-Blockchains und Ethereum. Die Erläuterungen zu diesen Ergebnissen stehen nach der Abbildung.

**Abbildung 16: SWOT-Analyse Ergebnisse von POS-Blockchains und Ethereum**

Strengths	Weaknesses
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vertrauen</li> <li>• Finanzielle Inklusion Anonymität (sehr hoch)</li> <li>• Automatisierung (Smart Contracts)</li> <li>• Keine Zwischenhändler</li> <li>• Kein Datenverlust/Manipulation/Fälschung</li> <li>• Dezentral organisierte Weiterentwicklung des Protokolls</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volatilität (einschließlich Spekulation)</li> <li>• Energieintensiv (jedoch weniger als bei POW-Protokollen)</li> <li>• Kein Kontakt im Falle des Verlusts von Zugangsdaten</li> <li>• Skalierbarkeit</li> <li>• Benutzerfreundlichkeit</li> </ul>
Opportunities	Threats
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbesserte digitale Kompetenz</li> <li>• Globaler Rückgang der Freiheit</li> <li>• Führende Nationen und globale Wirtschaften planen, stark in Technologie zu investieren</li> <li>• Trend zu mehr B2B und P2P Marktplätzen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regulatorische Hürden</li> <li>• hohe Ressourceninanspruchnahme</li> <li>• grosser Energieverbrauch</li> <li>• Zurückhaltung gegenüber neuer Technologie</li> </ul>

Quelle: Eigene Darstellung.

Die SWOT-Analyse von Ethereum weist eine hohe Ähnlichkeit zu jener von Bitcoin auf, wobei Ethereum als Plattform für andere DLT-Anwendungen analysiert wird. Zusätzlich zu den dort bereits genannten Stärken bietet Ethereum ein erhöhtes Maß an Pseudonymität, auch verglichen mit Bitcoin (Buczak 2023). Darüber hinaus bietet eine dezentral organisierte Weiterentwicklung des Protokolls eine dynamische Umgebung für die Verbesserung und Entwicklung neuer Anwendungen (Ganesan 2022).

Die Schwächen von Ethereum sind grundsätzlich dieselben wie bei Bitcoin, unterscheiden sich jedoch im Maß, in welchem sie zutreffen. Ethereum weist als POS-Blockchain zwar weiterhin eine höhere Energieintensität als herkömmliche Cloud-Infrastruktur-Dienste auf, jedoch in einem weitaus geringeren Ausmaß als Bitcoin. Die mangelnde Skalierbarkeit stellt auch ein wesentlich geringeres Problem dar, da in diesem Bereich bereits viele Fortschritte gemacht wurden (Bitcoin.com 2024).

Neben der Verbesserung der digitalen Kompetenzen bieten sich Ethereum noch weitere Chancen. Ethereum fungiert als Basisinfrastruktur für DAOs, deren Bedeutung zunehmend zunimmt. Zudem lässt sich ein Trend zu mehr B2B- und P2P-Plattformen beobachten, der sich ebenfalls positiv auf das Protokoll auswirken könnte.

Als Bedrohung sind, wie bei Bitcoin, die regulatorischen Hürden, die hohe Ressourceninanspruchnahme, der grosser Energieverbrauch und die Zurückhaltung der Konsumenten gegenüber neuer Technologien zu nennen.

### B.3 Lokale Energiemärkte

Die untenstehende Abbildung 17 veranschaulicht die Ergebnisse unserer SWOT-Analyse der blockchainbasierten, lokalen Energiemärkten Blockchains. Die Erläuterungen zu diesen Ergebnissen stehen nach der Abbildung.

**Abbildung 17: SWOT-Analyse Ergebnisse zu den lokalen Energiemärkten**

Strengths	Weaknesses
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexibilität und Wahlmöglichkeiten für Verbraucher (Autonomie)</li> <li>• Die Privatsphäre der Teilnehmer ist weniger exponiert als in zentralisierten Systemen</li> <li>• Verminderung von Energie- und Übertragungsverlusten</li> <li>• Fördert erneuerbare Energiequellen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Nachfrage ist für Netzbetreiber weniger vorhersehbar</li> <li>• Möglicherweise nicht so effizient wie zentralisierte Lösungen</li> </ul>
Opportunities	Threats
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Steigendes Interesse an Peer-to-Peer-Energiemärkten</li> <li>• Ausweitung der Produktion erneuerbarer Energie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regulatorische Hürden</li> <li>• Unklare Auswirkungen auf die Netzstabilität</li> </ul>

Quelle: Eigene Darstellung.

Zu den Stärken der dezentralen P2P-Energiemärkte zählt zunächst die Flexibilität und die Vielzahl an Wahlmöglichkeiten, die diese Technologie bietet (vgl. Zhou et al. 2020). Im Gegensatz dazu werden zentralisierte Systeme durch eine einzelne Koordinationsstelle gesteuert, was die Autonomie der Verbraucher, also die Möglichkeit, die Energiebereitstellung selbst auszuwählen, einschränken kann. Die dezentrale Natur des Systems gewährleistet zudem den Schutz der Privatsphäre der Teilnehmer, was insbesondere bei zentralisierten Lösungen nicht der Fall ist. Darüber hinaus tragen die dezentralen P2P-Märkte zur Reduzierung von Energie- und Übertragungsverlusten bei und fördern die Nutzung erneuerbarer Energiequellen, was letztlich zu einer Verringerung der Umweltbelastung führt. Zudem fördern solche P2P-Energiemärkte die Nutzung erneuerbarer Energiequellen.

Ogleich diese Stärken evident sind, sind auch einige Schwächen zu berücksichtigen. Die Nachfrage in dezentralen P2P-Energiemärkten ist für Netzbetreiber weniger vorhersehbar als in zentralisierten Systemen, was die Planung und Steuerung der Energieerzeugung erschwert (Zhou et al. 2020). Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass diese Lösungen möglicherweise nicht so effizient sind wie zentralisierte Energiemodelle, insbesondere in Bezug auf Skalierbarkeit und Ressourcennutzung.

Dennoch bieten sich zahlreiche Chancen für dezentrale P2P-Energiemärkte. Das steigende Interesse an P2P-Energiemärkten sowie die zunehmende Akzeptanz

erneuerbarer Energien könnten zu einem verstärkten Engagement und Wachstum dieser Märkte führen (Raffaele et al. 2023). Durch die Ausweitung der Produktion erneuerbarer Energien könnten diese Märkte einen bedeutenden Beitrag zur globalen Energiewende leisten.

Trotz der vielversprechenden Chancen sind auch potenzielle Bedrohungen zu berücksichtigen, denen dezentrale P2P-Energiemärkte gegenüberstehen. Regulatorische Unsicherheiten und mögliche Einschränkungen könnten auch die Entwicklung und Akzeptanz dieser Technologie beeinträchtigen. Darüber hinaus könnten unklare Auswirkungen auf die Netzstabilität durch die Dezentralisierung des Energiemarktes und die Abkehr von traditionellen zentralisierten Modellen eine Herausforderung darstellen.

#### B.4 Green Bonds

Die untenstehende Abbildung 18 veranschaulicht die Ergebnisse unserer SWOT-Analyse des Anwendungsfalls Green Bonds. Die Erläuterungen zu diesen Ergebnissen stehen nach der Abbildung.

**Abbildung 18: SWOT-Analyse Ergebnisse des Green Bonds Anwendungsfalls**

Strengths	Weaknesses
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Finanzielle Inklusion: erschließt neue Kundensegmente</li> <li>• Liquiditätsverbesserung</li> <li>• Anonymität</li> <li>• Reduziert Zwischenhändler</li> <li>• Senkung von Gebühren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volatilität Energieverbrauch</li> <li>• Benutzerfreundlichkeit</li> <li>• Skalierbarkeit</li> <li>• Interoperabilität</li> <li>• Neue Technologien</li> </ul>
Opportunities	Threats
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbesserte digitale Kompetenz</li> <li>• Bewegung hin zu saubereren Technologien</li> <li>• Erhöhter Investitionsfluss durch neue Investoren</li> <li>• Globaler Rückgang der Freiheit</li> <li>• Fördert Innovationen im Finanzwesen (Integration neuer Technologien)</li> <li>• Interesse an nachhaltigen Investitionen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regulatorische Hürden</li> <li>• hohe Ressourceninanspruchnahme</li> <li>• grosser Energieverbrauch</li> </ul>

Quelle: Eigene Darstellung.

Im Folgenden werden die Stärken der DLT-basierten nachhaltigen Finanzierungsplattformen erörtert. Auch diese fördern die finanzielle Inklusion und erschließen dadurch neue Kundensegmente, was einen breiteren Zugang zu nachhaltigen Investitionen ermöglicht. Des Weiteren bieten sie Pseudonymität und reduzieren die Abhängigkeit von Zwischenhändlern, was zu einer Senkung von Gebühren und Transaktionskosten führt. Tiefere Transaktionskosten resultieren in einer Senkung der Liquiditätsanforderungen.

Als Schwäche ist die Volatilität von Kryptowerte zu nennen, welche zu Unsicherheiten führen und die Akzeptanz beeinträchtigen kann. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass auch hier ein hoher Energieauf- und Ressourcenaufwand entsteht, was insbesondere bei nachhaltigen Investitionsmöglichkeiten als nachteilig erachtet wird. Die Benutzerfreundlichkeit sowie die Skalierbarkeit stellen weiterhin Herausforderungen dar. Des Weiteren kann ein Problem der

Interoperabilität beobachtet werden, da das Verschieben von Kapital zwischen Plattformen mit einem höheren Aufwand verbunden sein kann.

Die steigende digitale Kompetenz der Verbraucher sowie die Bewegung hin zu saubereren Technologien könnten das Interesse an nachhaltigen Investitionen und Finanzierungen weiter steigern und stellen wichtige Chancen dar. Der verstärkte Zufluss an Investitionen durch neue Investoren sowie das wachsende Interesse an Innovationen im Finanzwesen könnten das Wachstum dieser Plattformen weiter vorantreiben. Auch in diesem Kontext sind regulatorische Hürden sowie der Energieverbrauch und Ressourceninanspruchnahme weiterhin vorherrschende Faktoren.