

TEXTE

01/2024

Abschlussbericht

Machbarkeitsstudie für eine Registerarchitektur mit Distributed Ledger Technologie

von:

Prof. Dr. Philipp Sandner, Jong-Chan Chung, Robert Richter
Frankfurt School Blockchain Center

Dr. Steffen Reidt, Torben Hellmert
Capgemini Invent

Yukitaka Nezu, Martin Schäffner
Datarella

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 01/2024

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

Forschungskennzahl 3720 42 503 0
FB000970

Abschlussbericht

Machbarkeitsstudie für eine Registerarchitektur mit Distributed Ledger Technologie

von

Prof. Dr. Philipp Sandner, Jong-Chan Chung, Robert Richter
Frankfurt School Blockchain Center

Dr. Steffen Reidt, Torben Hellmert
Capgemini Invent

Yukitaka Nezu, Martin Schöffner
Datarella

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:

Frankfurt School of Finance & Management gGmbH, Frankfurt School Blockchain Center
Adickesallee 32-34
60322 Frankfurt am Main

Capgemini Deutschland GmbH
Potsdamer Platz 5
10785 Berlin

Datarella GmbH
Oskar-von-Müller-Ring 36
80333 München

Abschlussdatum:

Juni 2023

Redaktion:

Fachgebiet V 3.4 Registerführung
Silvia Voß

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Januar 2024

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

Übersicht und Rollenverteilung der Auftragnehmer

- ▶ Frankfurt School Blockchain Center (FSBC): Auftragnehmer
- ▶ Capgemini Invent: Unterauftragnehmer
- ▶ Datarella: Unterauftragnehmer

Die inhaltliche Rollenverteilung der Bieter ist dabei wie folgt:

- ▶ FSBC: Wissenschaftliche Expertise Blockchain
- ▶ Capgemini: Expertise Emissionshandel, Register, Implementierung private Blockchains
- ▶ Datarella: Umfassende Implementierungs-Expertise von Enterprise Blockchain Lösungen

Kurzbeschreibung: Machbarkeitsstudie für eine Registerarchitektur mit Distributed Ledger Technologie

Alle bekannten Emissionshandelsregister sind derzeit als Anwendungen auf der Basis von relationalen Datenbanken realisiert. Bei den Verhandlungen zur Umsetzung des Pariser Klimaabkommens (PA) wurde mehrfach die Nutzung der Blockchain-Technologie für die Verwaltung von ITMOS ins Spiel gebracht. Auch das UN-Klimasekretariat hat sich daraufhin mit der Technologie beschäftigt, ohne abschließend dazu Stellung zu nehmen. Vor diesem Hintergrund stellt die vorgeschlagene Lösungsarchitektur dieser Machbarkeitsstudie dar, wie heutige Rollen und Prozesse des Unionsregisters in DLT abgebildet werden können, ohne die bestehende Nutzererfahrung der verschiedenen Stakeholder wesentlich zu verändern. Das Unionsregister eignet sich deshalb am besten, weil es das am längsten realisierte und funktionierende Emissionshandelsregister ist, welches im bislang umfangreichsten Emissionshandelssystem, dem EU ETS, ein Kernelement darstellt. Hierbei bilden der Einsatz von sogenannten Smart Contracts und das Verknüpfen von Schlüsselpaaren zu bestehenden Accounts das Fundament. Die gewählte Architektur bietet wesentliche Vorteile gegenüber bereits bestehenden Architekturen, so z.B. die leichte Anbindbarkeit von Handelsplattformen über Smart Contracts oder der Einsatz von Wallets anstatt einer Browserschnittstelle für den Zugriff auf das Emissionshandelsregister. Darüber hinaus wird argumentiert, wie DLT wesentliche Vorteile beim Handel und bei der Identitätsverwaltung erschließen kann. Im Kern wurde festgestellt, dass ein Emissionshandelsregister wie das Unionsregister sich in DLT implementieren lässt. Dabei können gleichzeitig entscheidende Nachteile anderer DLT-Systeme (z.B. extrem hoher Stromverbrauch des Bitcoin Netzwerkes) vermieden werden. Bestimmte Blockchains bieten zudem eine schnellere, günstigere und komplexere Verbindung mit anderen ähnlichen Blockchains. Dies bietet perspektivisch effiziente Mittel und Wege zur Verbindung von verschiedenen Emissionshandelssystemen.

Abstract: Feasibility Study for a Register Architecture with Distributed Ledger Technology

All known emissions trading registers are currently implemented as applications based on relational databases. During the negotiations to implement the Paris Climate Agreement (PA), the use of blockchain technology for the administration of ITMOS was brought up several times. The UN climate secretariat then also dealt with the technology without taking a final position on it. Against this background, the proposed solution architecture of this feasibility study shows how today's roles and processes of the Union Registry can be mapped in DLT without significantly changing the existing user experience of the various stakeholders. The Union Registry is best suited as a case study because it is the longest established and functioning emissions trading registry, which represents a core element in the most extensive emissions trading system to date, the EU ETS. The use of so-called smart contracts and the linking of key pairs to existing accounts form the basis here. The selected architecture offers significant advantages over existing architectures, such as the easy connection of trading platforms via smart contracts or the use of wallets instead of a browser interface to access the emissions trading register. In addition, the present study argues how DLT can unlock significant advantages in commerce and identity management. In essence, it was determined that an emissions trading registry such as the Union Registry can be implemented in DLT. At the same time, decisive disadvantages of other DLT systems (for instance, the extremely high power consumption of the Bitcoin network) can be avoided. Certain blockchains also offer a faster, cheaper, and more complex connection to other similar blockchains. In perspective, this offers efficient ways and means of connecting different emissions trading systems.

Inhaltsverzeichnis

Übersicht und Rollenverteilung der Auftragnehmer	5
Inhaltsverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	10
Zusammenfassung	11
Summary	12
1 Zielsetzung und Vorgehen	14
1.1 Leitplanken & Richtungsweisung Umweltbundesamt	14
1.1.1 Richtungsweisung Umweltbundesamt	14
1.1.2 Leitplanken	14
1.2 Regulatorik & gesetzliche Vorgaben	15
1.3 Vorstellung DLT Bewertungsmatrix	15
1.4 Vorgehen Machbarkeitsstudie & Struktur der Folgekapitel	16
2 Emissionshandel Übersicht	18
2.1 Rollen und Beziehungen der Stakeholder im Unionsregister	18
2.2 Architektur und Inhalte des Unionsregisters	21
2.3 Prozesse und Abläufe im Unionsregister	23
2.3.1 Registrierung Unionsregister (Antrag, Kontotypen)	23
2.3.2 Bewerbungs- und Zuteilungsverfahren	25
2.3.3 EUA Transaktionen (Zuteilung, Auktion, Handel)	26
2.4 Ergebniszusammenfassung Unionsregister	28
3 Integration von DLT in das Unionsregister	30
3.1 DLT Bewertungsmatrix	30
3.1.1 Blockchain Konfigurationen	31
3.1.2 Zu betrachtende Blockchain-Protokolle	35
3.2 Anforderungen an DLT Unionsregister	38
3.3 Gegenüberstellung von Anforderungen und Eigenschaften der DLT Versionen	39
3.4 Empfehlung für ein Protokoll	42
4 Lösungsarchitektur	44
4.1 Vorgehen für das Ableiten der Lösungsarchitektur	44
4.2 Systemanforderungen	44
4.3 Komponentenbeschreibung einer DLT-basierten Architektur	45
4.3.1 Blockchain Setup	48

4.3.2	Kontentypen	49
4.3.3	Verlinkung Blockchain Identität mit Benutzeraccounts	49
4.3.4	Emissionsberechtigungen	50
4.3.5	Anwendungen und Prozesse.....	52
4.3.6	Verbindung DLT EU-ETS mit Kyoto Register	53
4.3.7	Auktion und Handel von Berechtigungen mit DLT.....	54
4.3.8	SSI im Emissionshandelssystem durch DLT.....	56
4.4	Systemvergleich	57
4.5	Ergebniszusammenfassung.....	59
4.5.1	Kernkomponenten und -Prozesse	60
4.5.2	Erweiterungen und Potenziale.....	60
5	Betrachtung Umsetzung.....	62
5.1	Zeitplan	62
5.2	Kosten- und Aufwandsschätzung.....	63
6	Effizienz und Nachhaltigkeit.....	65
6.1	Nutzbarkeit	65
6.1.1	Reifegrad der Technologie	65
6.1.2	Konfigurationsmöglichkeit.....	66
6.1.3	Wiederverwendbarkeit der Lösung	66
6.1.4	Größe der Entwicklergemeinde	66
6.2	Skalierbarkeit und Performanz	67
6.2.1	Konsensmechanismus.....	67
6.2.2	Nodes	67
6.2.3	Anwendungsfall	68
6.2.4	Zukünftige Erweiterungen	68
6.3	Interoperabilität.....	68
6.3.1	Interoperabilität zu anderen ETS	69
6.3.2	Interoperabilität zu bestehenden Systemen	70
6.3.3	Standardisierung.....	70
6.4	Sicherheit	71
6.4.1	Konsensmechanismus und Verteilung der Knoten.....	71
6.4.2	Verwendete Kryptografie	72
6.4.3	Datenschutz	73
6.4.4	Bekämpfung von Betrugsmodellen und Unterstützung von Ermittlungsbehörden.....	73

6.4.5	Prüfung und Ausgestaltung von Smart Contracts.....	74
6.5	Nachhaltigkeit	74
6.5.1	Klimaschutz	75
6.5.2	Energieverbrauch.....	75
6.5.3	Ressourcenschonung	75
6.5.4	Open-Source-Ansatz	76
6.6	Kosteneffizienz.....	76
6.6.1	Laufende Kosten	76
6.6.2	Einmalige Kosten.....	77
7	Fazit und Ausblick.....	78
7.1	Fazit Machbarkeitsstudie	78
7.2	Vision 2040.....	79
8	Glossar	80

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Architektur des Unionsregisters	22
Abbildung 2: Big Picture des Europäischen Emissionshandel	23
Abbildung 3: Compliance Cycle	25
Abbildung 4: Detailansicht Compliance Cycle	26
Abbildung 5: Zuteilungsantrag: Aufgaben der Akteure	27
Abbildung 6: Überblick der verschiedenen Blockchain-Konfigurationen	32
Abbildung 7: Einordnung der Blockchain-Konfigurationen.....	34
Abbildung 8: Bewertung DLT-Protokolle.....	41
Abbildung 9: Bewertung DLT-Protokolle erweitert.....	43
Abbildung 10: Schematische Systemarchitektur eines Blockchain-basierten EHS..	46
Abbildung 11: Smart Contract Aufteilung in einem Blockchain-basierten EHS.....	47
Abbildung 12: Der EUA/aEUA Lifecycle auf Blockchain-Basis	53
Abbildung 13: Beispiel einer Bonding Curve Funktion für dezentrale Börsen	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Teilnehmer des Europäischen Emissionshandels	19
Tabelle 2: Kontoarten des Europäischen Emissionshandels	23
Tabelle 3: Bewertungsmatrix: Entscheidungskriterien vs. Technologien	30
Tabelle 4: Anforderungen an das DLT-basierte Unionsregister	38
Tabelle 5: Anforderungsdefinition eines Blockchain-basierten Emissionshandelssystems.....	45
Tabelle 6: Eigenschaften der gängigen Token Standards auf Ethereum im Vergleich	51
Tabelle 7: Prozesse des Emissionshandels auf Blockchain-Basis	52
Tabelle 8: Der EUA/aEUA Lifecycle auf Blockchain-Basis – Beschreibung	53
Tabelle 9: Vergleich der Anforderungen zwischen aktueller und Blockchain- basierter Umsetzung	57
Tabelle 10: Übersicht Arbeitspakete mit geschätzten Personenmonaten im Zeitablauf.....	63
Tabelle 11: Übersicht Personenaufwände je Arbeitspaket.....	63

Zusammenfassung

Motivation und Beauftragung

DLT oder Blockchain ist eine Technik der Informationsverarbeitung, die noch relativ neu und insbesondere durch Kryptowährungen wie z.B. Bitcoin bekannt geworden ist. Die Leistungsfähigkeit dieser Technologie im Bereich von Kryptowährungen hat sich bereits vielfach gezeigt. Es liegt daher nahe zu untersuchen, ob diese Technologie grundsätzlich auch für die Software von Emissionshandelsregistern genutzt werden kann, weil diese im Grundsatz mit Online-Banking-Systemen vergleichbar sind. Insbesondere stellt sich die Frage, inwiefern Vorteile zu den bekannten Architekturen festgestellt werden können.

Alle bekannten Emissionshandelsregister sind derzeit als Anwendungen auf der Basis von relationalen Datenbanken realisiert. Bei den Verhandlungen zur Umsetzung des Pariser Klimaabkommens (PA) wurde mehrfach die Nutzung der Blockchain-Technologie für die Verwaltung von ITMOS ins Spiel gebracht. Auch das UN-Klimasekretariat hat sich daraufhin mit der Technologie beschäftigt, ohne abschließend dazu Stellung zu nehmen. Im Zuge der in Glasgow 2021 beschlossenen Regeln zum Artikel 6 des PA könnte eine DLT-Architektur wieder eine Rolle spielen.

Im Oktober 2020 hat das Umweltbundesamt (UBA) das FSBC mit einer Machbarkeitsstudie zur Nutzung der DLT für Emissionshandelsregister beauftragt. Ziel der Studie ist die Bewertung, ob DLT für die Umsetzung eines Emissionshandelsregisters in effizienter Art und Weise geeignet ist. Daraus kann abgeleitet werden, ob ein Verbleib bei einer klassischen Architektur mit zentraler relationaler Datenbank die sinnvollere Wahl wäre. Hierzu wurden als Hauptarbeitspakete zum einen das technische Konzept einer Emissionshandels-DLT und zum anderen die Betrachtung der Effizienz und Nachhaltigkeit einer Emissionshandels-DLT definiert.

Umsetzung

Da die Einsatzmöglichkeiten von DLT im Emissionshandel vielfältig sind, wurde zu Beginn der Bearbeitung der Machbarkeitsstudie der Umfang in Form von Leitplanken und Richtungsweisungen des UBA festgelegt. Wesentliche Vorgaben waren hierbei der Lösungshorizont 2030 und der Fokus auf einem DLT-basierten Unionsregister. Das Unionsregister eignet sich deshalb am besten, weil es das am längsten realisierte und funktionierende Emissionshandelsregister ist, welches im bislang umfangreichsten Emissionshandelssystem, dem EU ETS, ein Kernelement darstellt. Die Regeln und Prozesse sind ausgereift und können auch als Blaupause für eine Realisierung in anderen Kontexten (ETS2, nEHS, PA) genutzt werden.

Durch Definition und Bewertung von Entscheidungskriterien wurde der Lösungsraum für ein DLT-System passend eingeschränkt, um zu einer möglichst konkreten Lösungsarchitektur zu gelangen. Basierend auf einer Bewertung existierender DLT-Systeme und der aus der Bewertung resultierenden Lösungsarchitektur wurde zudem eine grobe Abschätzung von Aufwänden im Falle einer Umsetzung gegeben. Parallel zu all diesen Analysen und Aktivitäten wurde insbesondere die Effizienz und Nachhaltigkeit gemäß abgestimmter Entscheidungskriterien bewertet und in einem eigenen Kapitel dokumentiert.

Fazit

In der Lösungsarchitektur dieser Machbarkeitsstudie wird dargestellt, wie heutige Rollen und Prozesse des Unionsregisters in DLT abgebildet werden können, ohne die bestehende Nutzererfahrung wesentlich zu verändern. Hierbei bilden der Einsatz von sogenannten Smart Contracts und das Verknüpfen von Schlüsselpaaren zu bestehenden Accounts das Fundament.

Die gewählte Architektur bietet darüber hinaus wesentliche Vorteile gegenüber bereits bestehenden Architekturen, so z.B. die leichte Anbindbarkeit von Handelsplattformen über Smart Contracts oder der Einsatz von Wallets anstatt einer Browserschnittstelle für den Zugriff auf das Emissionshandelsregister. In Kapitel 4 wird dargestellt, wie DLT wesentliche Vorteile beim Handel und bei der Identitätsverwaltung erschließt.

Im abschließenden Kapitel dieser Studie wird dargestellt, wie aus einer idealtypischen Vision 2040 und entsprechend gewählten und bewusst nicht auflösbaren Einschränkungen eine Vision 2030 abgeleitet werden kann, die einen machbaren und maximal wertsteigernden Zwischenschritt darstellt. Dies schließt eine Schätzung des Aufwands für eine prototypische Realisierung ein.

Ein Emissionshandelsregister wie das Unionsregister lässt sich in DLT implementieren. Dabei können entscheidende Nachteile anderer DLT-Systeme (z.B. der extrem hoher Stromverbrauch des Bitcoin-Netzwerkes) vermieden werden. Mit der vorgeschlagenen Architektur können weitere Vorteile wie die Anbindung von Handelsplattformen, die Nutzung von Wallets oder die Verwendung von Identitäten, erschlossen werden, die mit der eingesetzten Architektur auf der Basis von relationalen Datenbanken nur mit deutlich größerem Aufwand zu erreichen sind. Cosmos-basierte Blockchains bieten zudem eine schnellere, günstigere und komplexere Verbindung mit anderen Cosmos-basierten Blockchains. Dies bietet effiziente Mittel und Wege zur Verbindung von verschiedenen Emissionshandelssystemen.

Summary

Motivation and Commissioning

DLT or blockchain is an information processing technology that is still relatively new and has become known in particular through cryptocurrencies such as Bitcoin. The capabilities of this technology in the field of cryptocurrencies has already been shown many times. It therefore makes sense to investigate whether this technology can in principle also be used for the software of emissions trading registers, because these are basically comparable to online banking systems. In particular, the question arises to what extent advantages over the known architectures can be identified.

All known emissions trading registers are currently implemented as applications based on relational databases. During the negotiations to implement the Paris Climate Agreement (PA), the use of blockchain technology for the administration of ITMOS was brought up several times. The UN climate secretariat then also dealt with the technology without taking a final position on it. In the course of the rules on Article 6 of the PA decided in Glasgow 2021, a DLT architecture could play a role again.

In October 2020, the Federal Environment Agency (UBA) commissioned the FSBC with a feasibility study on the use of DLT for emissions trading registers. The aim of the study is to assess whether DLT is suitable for the implementation of an emissions trading register in an efficient manner. From this it can be deduced whether staying with a classic architecture with a central relational database would be the more sensible choice. For this purpose, the technical concept of an emissions trading DLT and the consideration of the efficiency and sustainability of an emissions trading DLT were defined as main work packages.

Implementation

Since the possible uses of DLT in emissions trading are diverse, the scope of the feasibility study was defined in the form of guard rails and directives from the UBA at the beginning of the feasibility study. The key requirements here were the solution horizon 2030 and the focus on a DLT-based Union Registry. The Union Registry is best suited because it is the longest established and functioning emissions trading registry, which represents a core element in the most extensive emissions trading system to date, the EU ETS. The rules and processes are mature and can also be used as a blueprint for implementation in other contexts (ETS2, nEHS, PA).

By defining and evaluating decision criteria, the solution space for a DLT system was appropriately restricted in order to arrive at a solution architecture that was as specific as possible. Based on an evaluation of existing DLT systems and the solution architecture resulting from the evaluation, a rough estimate of the effort in the event of implementation was also given. In parallel to all these analyses and activities, efficiency and sustainability in particular were evaluated according to previously agreed-upon decision-making criteria and documented in a separate chapter.

Conclusion

The solution architecture of this feasibility study shows how current roles and processes of the Union Registry can be mapped in DLT without significantly changing the existing user experience. The use of so-called smart contracts and the linking of key pairs to existing accounts form the basis here. The selected architecture also offers significant advantages over existing architectures, such as the easy connection of trading platforms via smart contracts or the use of wallets instead of a browser interface to access the emissions trading register. Chapter 6 shows how DLT unlocks significant benefits in commerce and identity management.

In the concluding chapter of this study, it is shown how a Vision 2030 can be derived from an ideal-typical Vision 2040 and correspondingly selected and deliberately insoluble restrictions, which represents a feasible and maximum value-enhancing intermediate step. This includes an estimate of the effort for a prototype realization.

An emissions trading registry such as the Union Registry can be implemented in DLT. In doing so, decisive disadvantages of other DLT systems (e.g., the extremely high power consumption of the Bitcoin network) can be avoided. With the proposed architecture, further advantages such as the connection of trading platforms, the use of wallets or the use of identities can be developed, which can only be achieved with significantly greater effort with the architecture used on the basis of relational databases. Cosmos-based blockchains also offer faster, cheaper, and more complex interconnection with other Cosmos-based blockchains. This offers efficient ways and means of connecting different emissions trading systems.

1 Zielsetzung und Vorgehen

Dieses Kapitel definiert die Leitplanken für das Projektvorgehen sowie die Richtungsweisung durch das Umweltbundesamt, um die Erwartungen an Auftragnehmer und Auftraggeber frühzeitig im Projekt abzustimmen. Darüber hinaus wird die Bewertungsmatrix vorgestellt, welche ein grundlegendes Instrument zur späteren Eingrenzung von DLT-Technologien und deren Bewertung liefert. Abschließend wird das Vorgehen der Machbarkeitsstudie und die daraus resultierende Struktur der folgenden Kapitel erörtert.

1.1 Leitplanken & Richtungsweisung Umweltbundesamt

In der Startphase der Machbarkeitsstudie in Q1/2021 wurden in mehreren Meetings der Umfang und die Leitplanken gemeinsam zwischen dem Auftragnehmer und dem Umweltbundesamt abgesprochen. Ziel dieses anfänglichen intensiven Austausches war es, die Anforderungen und Leitplanken für Technologien / Protokolle und Entscheidungskriterien möglichst konkret festzulegen. Hieraus haben sich die folgende Richtungsweisung und Leitplanken ergeben:

1.1.1 Richtungsweisung Umweltbundesamt

Ziel des Umweltbundesamtes ist es, anhand dieser Machbarkeitsstudie zu prüfen, ob die Einführung einer DLT-basierten Registerarchitektur für den Emissionshandel neue Effizienzen und Möglichkeiten der Automatisierung mit sich bringt. Einer der Verbesserungsansätze, die eine DLT-basierte Lösung liefert, ist die Reduktion manueller Schritte. Zum Beispiel kann die Verwaltung von Identitäten vollkommen digital abgewickelt werden, ohne z.B. Scans von Personalausweisen manuell in das System einpflegen zu müssen. Dies wird ausführlicher in Kapitel 4.3 erläutert.

Ein weiterer Verbesserungsansatz ist, dass eine DLT-basierte Lösung die Möglichkeit bietet, mit anderen DLT-Systemen zu interagieren. Zum Beispiel könnte ein DLT Register Informationen automatisch an eine DLT Handelsbörse weitergeben oder sich mit anderen Registern innerhalb der EU abgleichen. Da anzunehmen ist, dass in Zukunft auch andere Systeme auf DLT basieren werden, würde dies die Effizienz stark fördern.

1.1.2 Leitplanken

- ▶ Der Fokus der Studie liegt auf der Analyse der Machbarkeit eines DLT-basierten Unionsregisters und nicht auf einer DLT-basierten Handelsplattform, da der Handel durch eine Drittpartei, einer externen Börse durchgeführt wird.
- ▶ Der Lösungshorizont der dargestellten Ergebnisse zielt auf eine Umsetzung im Jahre 2030 ab. Somit wird bei der Lösungsbeschreibung eine fortgeschrittene Entwicklung von digitalen Währungen sowie Identitäten vorausgesetzt. Diese Studie nimmt an, dass die Europäische Zentralbank bis zum Jahr 2030 einen digitalen, programmierbaren Euro als offizielles Zahlungsmittel eingeführt haben wird.
- ▶ Ebenfalls wird angenommen, dass derzeitige Sicherheitsbedenken durch Quanten-Computing mittels einer Weiterentwicklung von DLT-Protokollen entgegengewirkt werden können.
- ▶ Architekturvorschläge orientieren sich stark an einer späteren Nutzbarkeit der Lösung.

- ▶ Die Machbarkeitsstudie berücksichtigt auch die Wiederverwendbarkeit der Lösung und die sich daraus ergebenden Synergieeffekte mit anderen ETS.
- ▶ Der Fokus der Studie bezieht sich auf die in der Bewertungsmatrix genannten und damit verbundenen Entscheidungskriterien. Nicht betrachtet werden beispielsweise rechtliche und steuerrechtliche Aspekte.
- ▶ Die Arbeit des Auftragnehmers im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie beinhaltet keine Steuer- oder Rechtsberatung im Sinne des deutschen Rechtsberatungsgesetzes (RBerG). Jede hier dargestellte Lösung, sowohl mündlich als auch schriftlich, dient lediglich der ausführlichen Darstellung der technologischen Möglichkeiten inklusive Chancen und Risiken für den Einsatz von DLT in einer Registerarchitektur.

1.2 Regulatorik & gesetzliche Vorgaben

Die Regulierung und gesetzlichen Vorgaben von DLT stehen in Deutschland, Europa und der Welt noch am Anfang. Was sich bereits abzeichnet ist eine generelle Offenheit ggü. der Technologie, um Innovation zu fördern, sowie eine sukzessive rechtliche Absicherung von Anwendungsfällen, wenn diese an Bedeutung gewinnen. Die Abbildung von Rechten (z.B. das Recht auf CO₂ Ausstoß) als Token bedarf insbesondere einer klaren rechtlichen Grundlage. Hierzu gibt es bereits erste gute Vorstöße wie bspw. im Liechtenstein Blockchain Act, zu welchem wir folgenden Artikel von Prof. Philipp Sandner als Referenz empfehlen: [Liechtenstein Blockchain Act](#).

Es sind zudem grundsätzliche Regulierungen zu erwarten, welche die Verlässlichkeit von DLT sicherstellen (unter anderem für die Investitionssicherheit), damit IT-Sicherheitsanforderungen erfüllt sind und die ökologische Nachhaltigkeit beachtet wird. So ist z.B. die Kompatibilität der Blockchain-Technologie mit der Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) erforderlich. Grundsätzlich kollidiert sie nicht mit der aktuellen DSGVO. Es gilt eher, DLT stets datenschutzkonform auszugestalten und anzuwenden.

Entwicklungen sind im Bereich der Durchsetzbarkeit des Rechts für Blockchain-Strukturen zu erwarten, insbesondere wenn diese nationale Grenzen bzw. supranationale Grenzen überschreiten. Internationale Schlichtungsstellen sind für die juristischen Herausforderungen auf dieser Ebene zu erwarten.

In dieser Machbarkeitsstudie wird im Folgenden nicht weiter auf Regulatorik eingegangen. Zum einen ist die Rechtslage für den avisierten Zeitraum 2030 nicht absehbar. Zum anderen ist abzusehen, dass wie zuvor argumentiert die Regulatorik und Gesetzgebung keine Einschränkung, sondern eher Klarheit und Rechtssicherheit schaffen wird.

1.3 Vorstellung DLT Bewertungsmatrix

Im Rahmen der anfänglichen Abstimmungen in Q1/2021 wurden neben den Leitplanken ebenfalls die Bewertungskriterien vorgestellt und die Entscheidungskriterien abgestimmt. Hierzu wurden Knock-Out Kriterien in Q1/2021 mit dem UBA abgestimmt, um bestimmte Protokolle frühzeitig auszuschließen und eine Fokussierung auf die verbleibenden zu legen.

Die DLT Bewertungsmatrix ist eine 2-dimensionale Matrix, mit den zwei Dimensionen „Bewertungskriterien“ und „DLT Protokolle“. Eine solche Matrix wurde im Rahmen früherer Forschungsarbeiten des FSBC öfter eingesetzt und bzgl. Kriterien und DLT-Protokollen für diese Machbarkeitsstudie entsprechend angepasst. Die Zellen der Bewertungsmatrix enthalten in Form von Harvey-Balls eine qualitative Einschätzung des jeweiligen Kriteriums pro DLT-

Protokoll. Die DLT Matrix wird später in Kapitel 3 „Integration von DLT in das Unionsregister“ befüllt, um eine Eingrenzung der DLT-Protokolle vorzunehmen.

Die Entscheidungskriterien sind im Rahmen der Machbarkeitsstudie:

- ▶ Nutzbarkeit (aus Entwicklersicht)
- ▶ Skalierbarkeit, Performanz
- ▶ Interoperabilität
- ▶ Sicherheit
- ▶ Nachhaltigkeit
- ▶ Kosteneffizienz

Jede dieser Kriterien wird in der Bewertungsmatrix ausgewertet. Obgleich alle Kriterien eine sehr hohe Relevanz für das UBA aufweisen, steht die Gewährleistung der Sicherheit des Emissionshandelsregisters für das Umweltbundesamt an erster Stelle, da die Reputation des Emissionshandels von der Sicherheit abhängt. Die Interoperabilität wurde in Absprache mit dem UBA auch als wichtig gestuft mit der Besonderheit, dass die Interoperabilität an Wichtigkeit zunimmt, sobald andere Emissionshandelsregister ebenfalls ähnliche DLTs als technologische Infrastruktur setzen sollten.

Die im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie betrachteten DLT Protokolle sind:

- ▶ Public Ethereum
- ▶ Private Ethereum
- ▶ Cosmos SDK
- ▶ Hyperledger Fabric

In Kapitel 3 „Integration von DLT in das Unionsregister“ wird auf die Auswahl dieser Protokolle detaillierter eingegangen.

1.4 Vorgehen Machbarkeitsstudie & Struktur der Folgekapitel

Basierend auf den dargelegten Leitplanken, Richtungsweisungen und der DLT-Bewertungsmatrix als Bewertungs-Instrument, ist das Vorgehen in den folgenden Kapiteln wie folgt strukturiert:

Kapitel 2 Emissionshandel Übersicht

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht des heutigen Emissionshandels. Zur Erarbeitung der Rollen, Prinzipien und Funktions- und Arbeitsweisen der Teilnehmer im Emissionshandel werden die beteiligten “Stakeholder” in diesem System identifiziert und beschrieben. Anschließend werden die einzelnen Prozesse zwischen den Stakeholdern kurz erläutert. Darüber hinaus geben wir einen Einblick in die aktuelle Architektur des Unionsregisters mit der Interaktion mit weiteren nationalen und internationalen Registersystemen.

Kapitel 3 Integration von DLT in das Unionsregister

Auf Basis dieser Beschreibung des Emissionshandelsregisters und der Vorgaben des Umweltbundesamtes beschreiben wir die Anforderungen an die DLT für einen möglichen

Einsatz im Rahmen des Unionregisters und gehen auf die Integration von DLT in das Emissionshandelsregistersystem ein. Mithilfe der Bewertungsmatrix und der Gewichtung der Bewertungsfaktoren überprüfen wir im Anschluss den Einsatz der von uns identifizierten DLTs für einen Einsatz für das Emissionshandelsregistersystem. Unsere Analyse untersucht die Vor- und Nachteile sowie die Möglichkeiten und Risiken des Einsatzes der einzelnen DLT-Systeme. Abschließend leiten wir daraus eine Empfehlung für eine DLT für den Einsatz im Emissionshandelsregistersystem ab.

Kapitel 4: Lösungsarchitektur

Aufbauend auf der Empfehlung einer DLT erarbeiten wir im nächsten Kapitel eine DLT-basierte Lösungsarchitektur für das Emissionshandelsregistersystem, anhand derer die Implikationen eines DLTs untersucht und beschrieben werden können.

Kapitel 5: Betrachtung Umsetzung

Im anschließenden Kapitel geben wir eine grobe Abschätzung für die Umsetzung der zuvor gezeigten Lösungsarchitektur ab. Wir leiten dabei einen Zeitplan sowie eine grobe Kostenschätzung für die Umsetzung eines DLT-basierten Emissionshandelsregistersystems ab.

Kapitel 6: Effizienz und Nachhaltigkeit

Diese Kapitel diskutiert im Detail sechs Kriterien der Effizienz und Nachhaltigkeit, welche ebenfalls als Kriterien in der Bewertungsmatrix genutzt wurden.

Kapitel 7: Fazit und Ausblick

Im abschließenden Kapitel werden die Resultate, Limitationen und das Fazit unserer Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf die weiteren Entwicklungen der DLT bzw. Blockchain-Technologie im Allgemeinen und hinsichtlich des Emissionshandelsregistersystems und Emissionshandels gegeben. Wir zeigen auf, welche Vorteile der DLT-Einsatz im Rahmen des Unionsregisters bringen kann und welche anderen Einsatzmöglichkeiten von DLT im Rahmen des Emissionszertifikatehandels existieren.

2 Emissionshandel Übersicht

Um entsprechend des Anwendungsbereiches einer DLT im Emissionshandel die konzeptionellen und technischen Anforderungen an eine mögliche Trägertechnologie ableiten zu können, ist vorab eine grundlegende Kenntnis der Aufgaben, Prinzipien und Funktionsweisen des Emissionshandels notwendig. In diesem Kapitel behandeln wir die Ziele, Funktionsweise, involvierten Stakeholder und Architektur des Emissionshandels und stellen damit eine umfassende Übersicht dar.

Ziel des Emissionshandels ist, mithilfe marktwirtschaftlicher Mechanismen die Emissionsmengen klimaschädlicher Treibhausgase gemäß des Kyoto-Protokolls sukzessive zu reduzieren. Das europäische Emissionshandelssystem nahm im Jahr 2005 mit der ersten Handelsperiode den Betrieb auf und basiert im Wesentlichen auf der Emissionshandelsrichtlinie 2003/87/EG, die inzwischen allerdings schon mehrfach überarbeitet wurde.

Das Funktionsprinzip des derzeitigen europäischen Emissionshandels sieht vor, dass emissionshandelspflichtige Anlagen und Luftfahrzeugbetreiber für den Ausstoß von klimaschädlichen Gasen, beispielsweise Kohlenstoffdioxid (CO₂), entsprechende Berechtigungen benötigen. Diese Berechtigungen sind in ihrer Summe entsprechend der Klimaschutzabsichten begrenzt und werden nach definierten Kriterien von den jeweiligen Emissionshandelsstellen ausgegeben. Zum Ausstoß von Treibhausgasen ist folglich nur derjenige berechtigt, der über entsprechende Berechtigungen verfügt. Reduziert ein Unternehmen hingegen seine Emissionen, beispielsweise durch eine umweltfreundliche Modernisierung, kann es die erhaltenen Emissionsberechtigungen an Unternehmen mit einem erhöhten Ausstoß verkaufen. Die grundsätzliche Zuteilungsmethode ist die Auktionierung. Als Auktionsplattform wurde die Energiebörse European Energy Exchange (EEX) in Leipzig beauftragt.

Die folgenden Kapitel geben einen Überblick über die im Europäischen Emissionshandel involvierten Parteien, die Inhalte und Architektur des Unionsregisters, sowie Prozesse und Abläufe im Unionsregister.

2.1 Rollen und Beziehungen der Stakeholder im Unionsregister

In diesem Kapitel sollen die unterschiedlichen Parteien, welche am Europäischen Emissionshandel teilnehmen, diesen gestalten und kontrollieren sowie in unterstützenden Aktivitäten involviert sind, vorgestellt werden. Auf Basis ihrer Aktivitäten lassen sich die Parteien in drei Gruppen einteilen.

Gruppe 1: Teilnehmer am Europäischen Emissionshandel

Diese Gruppe umfasst Anlagenbetreiber sowie Luftfahrzeugbetreiber. Die Mitglieder dieser Gruppe sind zur Teilnahme am Europäischen Emissionshandel verpflichtet und erhalten durch kostenlose Zuteilung, Auktionen oder den Handel Zugang zu Emissionsberechtigungen. Über diese Pflichtteilnehmer hinaus sind ebenfalls Händler zu berücksichtigen, welche ebenfalls an Auktionen und dem Handel von Emissionsberechtigungen teilnehmen können. Diese unterliegen nicht der Verpflichtung Emissionsberechtigungen zum Ausgleich ihrer jährlich verursachten Emissionen zu erwerben und somit auszugleichen.

Gruppe 2: Kontrollorgane des Europäischen Emissionshandel

Die zweite Gruppe umfasst die Parteien, welche den Emissionshandel auf der europäischen und nationalen Ebene steuern, kontrollieren und weiterentwickeln. Die Machbarkeitsstudie fokussiert sich bei dieser Gruppe auf die Europäische Kommission und die für Deutschland zuständige Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt.

Gruppe 3: Unterstützer des Europäischen Emissionshandels

Die dritte Gruppe beinhaltet weitere Parteien, welche die kontrollierenden Organe in der Umsetzung des Emissionshandels unterstützen. Dies umfasst unabhängige Prüfstellen sowie Handelsplätze, beispielweise die European Energy Exchange (EEX) und European Commodity Clearing AG (ECC). Prüfstellen unterstützen den Europäischen Emissionshandel durch Prüfarbeiten z.B. von Zuteilungsanträgen und den jährlichen Emissionsberichten der Anlagenbetreiber, während die EEX und ECC die notwendige Infrastruktur und Plattform für die Durchführung von Auktionen und Handel von Emissionsberechtigungen bereitstellen. Tabelle 1: Teilnehmer des Europäischen Emissionshandels stellt die Parteien der jeweiligen Gruppen detailliert dar.

Tabelle 1: Teilnehmer des Europäischen Emissionshandels

Gruppe	Partei	Beschreibung
Teilnehmer	Anlagenbetreiber	<p>Große Energieanlagen, insbesondere Fossil-befeuerte Kraftwerke, Heizkraftwerke (Kraft-Wärme-Kopplung) und Heizwerke (jeweils ab 20 MW Feuerungswärmeleistung)</p> <p>Energieintensive Industrieanlagen, beispielsweise Hochöfen der Stahlindustrie, Raffinerien und Zementwerke</p> <p>Anlagen, die bei der Adipin- und Salpetersäureherstellung Lachgas (N₂O) freisetzen, sowie Anlagen, die bei der Primäraluminium-herstellung perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC) emittieren. Diese sind auch mit ihren N₂O- bzw. PFC-Emissionen emissionshandelspflichtig. Diese Gase sind deutlich um das 300-fache klimaschädlicher als CO₂ –Lachgas und PFC um mehr als das 6000-fache. (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2019)</p>
Teilnehmer	Luftfahrzeugbetreiber	<p>Seit 2012 unterliegen innereuropäische Fluggesellschaften, welche im Europäischen Wirtschaftsraum (EWR) operieren dem Europäischen Emissionshandel. Diese Regelung gilt bis 2023. (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2018a)</p>
Teilnehmer	Händler	<p>Berechtigte Teilnehmer nach der EU-Auktionsverordnung sind: Anlagenbetreiber, die auf eigene Rechnung bieten, einschließlich Mutterunternehmen, Tochtergesellschaften und Verbundunternehmen.</p> <p>Wertpapierfirmen und Kreditinstitute, die auf eigene Rechnung oder im Kundenauftrag Gebote abgeben. Diese Unternehmen müssen nach der MiFID (Richtlinie 2004/39/EG) bzw. nach der Kreditinstitut-Richtlinie (Richtlinie 2006/48/EG) genehmigt sein.</p>

Gruppe	Partei	Beschreibung
		<p>Wirtschaftliche Zusammenschlüsse von Anlagen- oder Luftfahrzeugbetreibern, die auf eigene Rechnung oder im Namen ihrer Kunden bieten.</p> <p>Personen, die unter Art. 2 (1) (i) der MiFID fallen (Nebentätigkeitsausnahme), die auf eigene Rechnung oder im Auftrag von Kunden bieten. Diese bedürfen für die Auktionen jedoch einer speziellen Genehmigung durch die zuständige nationale (Finanz) -Regulierungsbehörde des Mitgliedstaates, in dem sie niedergelassen sind (European Energy Exchange AG, 2021)</p>
Europäisches Kontrollorgan	Europäische Kommission	<p>In Zusammenarbeit mit den nationalen Behörden der EU-Mitgliedsstaaten stellt die Europäische Kommission den Betrieb des Europäischen Emissionshandels sicher. Ihre Aufgaben umfassen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Verwaltung Unionsregister (EU-Emissionshandelsregister) - Versteigerung von Zertifikaten - Genehmigung der Zuteilungstabellen <p>(Deutsche Emissionshandelsstelle, 2018b)</p>
Nationales Kontrollorgan	Deutsche Emissionshandelsstelle	<p>Die DEHSt ist die für deutsche Anlagen- und Luftfahrzeugbetreiber und auch andere Nutzer des deutschen Teils des Unionsregisters zuständige nationale Behörde und übernimmt die folgenden Aufgaben:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Verwaltung der deutschen Konten im EU-Emissionshandelsregister - Versteigerung von Zertifikaten - Zuteilung von Zertifikaten - Genehmigung der Überwachungspläne <p>(Deutsche Emissionshandelsstelle, 2018b)</p>
Unterstützer	Prüfstelle	<p>Prüfstellen verifizieren die Angaben in Form von Anträgen und Berichten der Anlagen- und Luftfahrzeugbetreiber im Rahmen des Europäischen Emissionshandelssystems. Seit der 3. Handelsperiode sind nur noch akkreditierte oder zertifizierte Prüfstellen zur Verifizierung berechtigt. In Deutschland ansässige juristische Personen oder Personengesellschaften werden durch die Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DakKS) akkreditiert. Natürliche Personen (Einzelunternehmen bzw. Freiberufler) werden hingegen durch die Deutsche Akkreditierungs- und Zulassungsgesellschaft für Umweltgutachter mBH (DAU) zertifiziert (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2013).</p>
Unterstützer	European Energy Exchange	<p>Die European Energy Exchange ist die führende Energiebörse in Europa. Sie agiert als gemeinsame Auktionsplattform für 25 EU-Mitgliedsstaaten und als separat zu betrachtenden Opt-out Auktionsplattform für den EU-Mitgliedsstaat Deutschland. Für diesen übernimmt sie die Auktionierung und den Handel von Emissionsberechtigungen (European Energy Exchange AG, 2022).</p>
Unterstützer	European Commodity Clearing AG	<p>Die ECC ist ein auf Energie- und Rohstoff-Produkte spezialisiertes Clearing Haus. Es übernimmt die Abwicklung von Transaktionen der European Energy Exchange im Rahmen der Auktionierung von Emissionsberechtigungen (European Commodity Clearing, 2022).</p>

2.2 Architektur und Inhalte des Unionsregisters

In diesem Unterkapitel sollen der Aufbau sowie Inhalte des Unionsregisters genauer beschrieben werden. Dafür wird zunächst auf den Zweck des Unionsregisters eingegangen. Anschließend werden die zwei Hauptbestandteile des Unionsregisters, der Kyoto-Bereich und der Bereich des Europäischen Emissionshandelssystems (EU-ETS), beschrieben. Hierbei werden auch die Bestandteile der jeweiligen Bereiche beleuchtet, welche sich aus Konten, Zertifikaten und Transaktionslogs zusammensetzen.

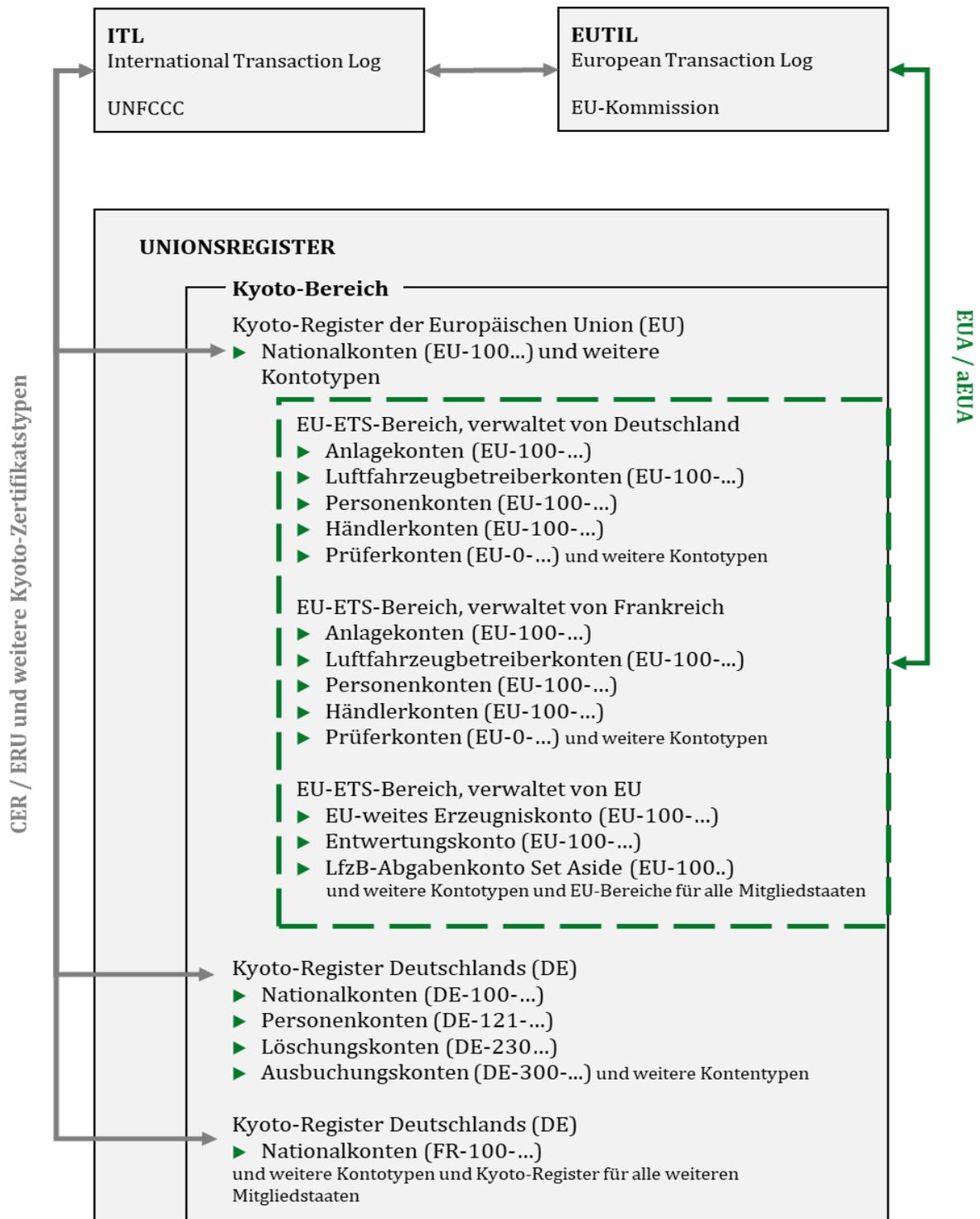
Das Unionsregister beschreibt ein elektronisches Verzeichnis, in dem der Besitz von Emissionszertifikaten auf Konten erfasst ist. Das Register dient lediglich als Nachweisinstrument der Minderungsverpflichtung aus dem Kyoto-Protokoll, nicht aber als Handelsplattform. Während die Eröffnung und Verwaltung der Konten in der Verantwortung der Mitgliedstaaten liegt, wird die Entwicklung und der Betrieb des Unionsregisters hingegen von der Europäischen Kommission übernommen.

Wie in Abbildung 1 dargestellt, lässt sich das Unionsregister in den Kyoto-Bereich und EU-ETS Bereich unterteilen. Der Kyoto-Bereich beinhaltet das Kyoto-Register der Europäischen Union sowie die nationalen Kyoto-Register der jeweiligen EU-Staaten. Das International Transaction Log (ITL) überprüft Transaktionen von Kyoto-Zertifikaten und wird von der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) nach den "Data Exchange Standards for Registry Systems under the Kyoto Protocol" (DES) betrieben. In den nationalen Kyoto-Registern sind Nationalkonten, Personenkonten, Löschungskonten, Ausbuchungskonten und andere Kontentypen angelegt (https://www.dehst.de/DE/Europaeischer-Emissionshandel/Unionsregister/Registerarchitektur/registerarchitektur_node.html, aufgerufen am 03.08.2021).

Diese enthalten Certified Emission Reduction (CER), dt. Zertifizierte Emissionsreduktionen, Emission Reduction Units (ERU), dt. Emissionsreduktionseinheiten, Kyoto-Zertifikate und EUA im internationalen Kontext. Seit dem 01.05.2021 sind Transaktionen von CER und ERU nur noch von EU-ETS-Konten zu Kyoto-Konten oder zwischen Kyoto-Konten sowie eine freiwillige Löschung möglich. Im EU-ETS befinden sich die Anlagenkonten, Luftfahrzeugbetreiberkonten, Händlerkonten, Nationalkonten und Prüferkonten, welche vom jeweiligen Mitgliedsland zugeordnet sind und von diesem verwaltet werden.

Diese halten European Emission Allowances (EUA), dt. Emissionsberechtigungen sowie Aviation Allowances (aEUA/ EUAA), dt. Luftverkehrsberechtigungen und können nur auf EU-Konten und Konten verlinkter Systeme transferiert werden. Das heißt, EUA, aEUA, CHU und CHUA können nur auf Konten gehalten werden, deren Kontokennung mit EU-100 oder CH-100 beginnt. Transaktionen mit EUA, EUAA, CHU und CHUA innerhalb des Unionsregisters (auch über Grenzen von EU-Nationalstaaten hinweg) werden als interne Transaktionen bezeichnet. Ebenso werden Transaktionen mit Kyoto-Zertifikaten innerhalb eines nationalen Kyoto-Registers als interne Transaktion bezeichnet. Findet eine Transaktion mit Kyoto-Zertifikaten zwischen zwei Mitgliedsstaaten statt, nennt man sie externe Transaktion.

Abbildung 1: Architektur des Unionsregisters

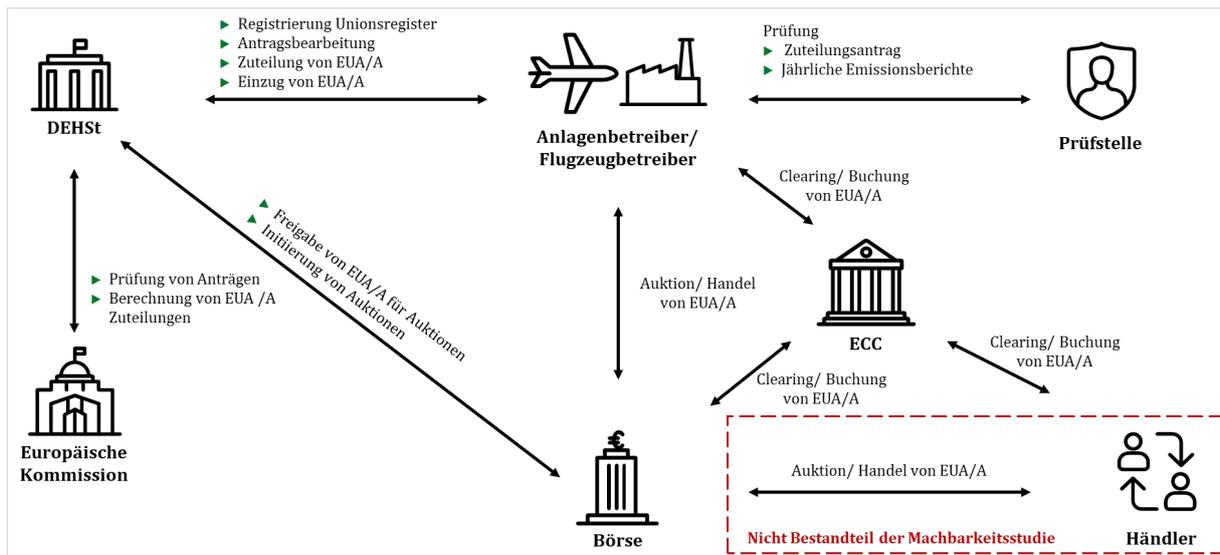


Unionsregister mit konsolidierten Kyoto-Registern der EU-Mitgliedstaaten
 Quelle: (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2020b)

2.3 Prozesse und Abläufe im Unionsregister

Der Europäische Emissionshandel lässt sich in seiner Funktion in drei Aufgaben untergliedern. (1) Die regelmäßige Bewertung und Berechnung von kostenlosen Emissionsberechtigungen für qualifizierte Anlagen- und Luftfahrzeugbetreiber, (2) die initiale Registrierung bei der zuständigen nationalen Behörde und Kontoeröffnung im Unionsregister, (3) die Ausschüttung, Auktionierung, Handel und Abgabe von Emissionsberechtigungen. Die drei Bereiche werden in den folgenden Abschnitten im Detail vorgestellt und sind in der folgenden Abbildung 2 als „Big Picture“ dargestellt.

Abbildung 2: Big Picture des Europäischen Emissionshandel



Quelle: eigene Darstellung, Capgemini Invent

2.3.1 Registrierung Unionsregister (Antrag, Kontotypen)

Die Registrierung eines Anlagen- oder Luftfahrzeugbetreibers einer Person oder Gesellschaft stellt einen einmaligen Vorgang dar, welcher zur Teilnahme am Europäischen Emissionshandel durchzuführen ist. Konten werden in den jeweiligen Registerbereichen der zuständigen Nationalstaaten eröffnet und können einen von vier Typen annehmen: Anlagenkonto, Luftfahrzeugbetreiberkonto, Handelskonto und Prüferkonto. Darüber hinaus können Personenkonten im nationalen Kyoto-Register eingerichtet werden. In der nachfolgenden Tabelle 2 sind weiterführende Informationen zu den verschiedenen Kontoarten ausgeführt. Alle Kontoangaben müssen durch die Kontobetreiber jährlich auf Richtigkeit geprüft und bestätigt werden.

Tabelle 2: Kontoarten des Europäischen Emissionshandels

Konto	Beschreibung
Anlagenkonto	Betreiber einer emissionshandlungspflichtigen Anlage benötigen ein Anlagenkonto im deutschen Teil des Unionsregisters. Über dieses Konto erfolgt der Nachweis, dass die Anlage den Verpflichtungen des EU-ETS nachkommt (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2021c).

Konto	Beschreibung
Luftfahrzeugbetreiberkonto	Luftfahrzeugbetreiber, die in der Verwaltungsmitgliedsstaatenliste Deutschland zugeordnet sind, benötigen ein Luftfahrzeugbetreiberkonto im deutschen Teil des Unionsregisters. Über dieses Konto erfolgt der Nachweis, dass der Luftfahrzeugbetreiber den Verpflichtungen des EU-ETS nachkommt (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2021c).
Händlerkonto	Händlerkonten können von juristischen und natürlichen Personen im EU-ETS-Teil des Unionsregisters eröffnet werden. Von diesen Konten können keine Abgabetransaktionen zur Erreichung der Compliance von Betreibern erfolgen (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2021c).
Prüferkonto	Prüferkonten dienen ausschließlich dem Zugang von Prüfstellen zum Unionsregister. Auf diesen Konten können keine Berechtigungen gehalten werden. Nur akkreditierte Prüfstellen können ein Prüferkonto im Unionsregister eröffnen. Anlagen- oder Luftfahrzeugbetreiber müssen ihrem Konto eine Prüfstelle zuordnen. Diese Zuordnung muss dann von der Prüfstelle bzw. deren kontobevollmächtigten Personen im Unionsregister bestätigt werden. Erst wenn dies erfolgt ist, kann die Prüfstelle bei den entsprechenden Anlagen- und Luftfahrzeugbetreiberkonten die geprüften Emissionen im Unionsregister eintragen beziehungsweise bestätigen (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2021c).
Personenkonto im nationalen Kyoto-Register	Personenkonten können im Kyoto-Bereich des Unionsregisters eröffnet werden. Konten im Kyoto-Bereich sind zum Beispiel notwendig, wenn aus dem CDM-Register CER an Projektbeteiligte ausgeschüttet werden. Gemäß den Kyoto-Regeln kann diese Ausschüttung nur auf Konten in nationalen Kyoto-Registern erfolgen, die dem CDM-Projekt zugestimmt haben. Auf Konten des Kyoto-Bereichs können keine europäischen und Schweizer Berechtigungen (EUA, aEUA, CHU, CHUA) gehalten werden (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2021c).

Die Beantragung eines Kontos im Unionsregister umfasst fünf Schritte (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2021c). Diese werden nachfolgend in Kürze dargestellt.

Schritt 1: Registrierung beim Authentifizierungsdienst EU-Login

Zukünftige kontobevollmächtigte Personen müssen sich einmalig beim Authentifizierungsdienst EU-Login registrieren und einen Zugang anlegen.

Schritt 2: Erzeugen der Nutzer-ID (URID) im Unionsregister

Bei der Erstanmeldung einer kontobevollmächtigten Person im Unionsregister erstellt dieses eine individuelle URID. Die Identität von erstmalig als kontobevollmächtigte Person ernannte Nutzer wird anhand der im Kontoantrag (Schritt 4) bereitgestellten Unterlagen geprüft.

Schritt 3: Beantragen eines Kontos

Nach Erstellung der URID kann die kontobevollmächtigte Person den zu beantragenden Kontotyp auswählen. Anlagenbetreiber benötigen ein Anlagenkonto, Luftfahrzeugbetreiber ein Luftfahrzeugbetreiberkonto. Darüber hinaus können natürliche oder juristische Personen ein Handelskonto eröffnen.

Schritt 4: Übersenden des Kontoantrags und der Nachweisdokumente

Im vierten Schritt der Onlinebeantragung des Registerkontos wird ein PDF-Dokument mit den Angaben des Antrags an die kontobevollmächtigte Person verschickt. Das Dokument muss

zusammen mit den angefragten Nachweisen elektronisch über die virtuelle Poststelle oder im Fall eines Handels- und Personenkontos alternativ als Briefpost versenden werden.

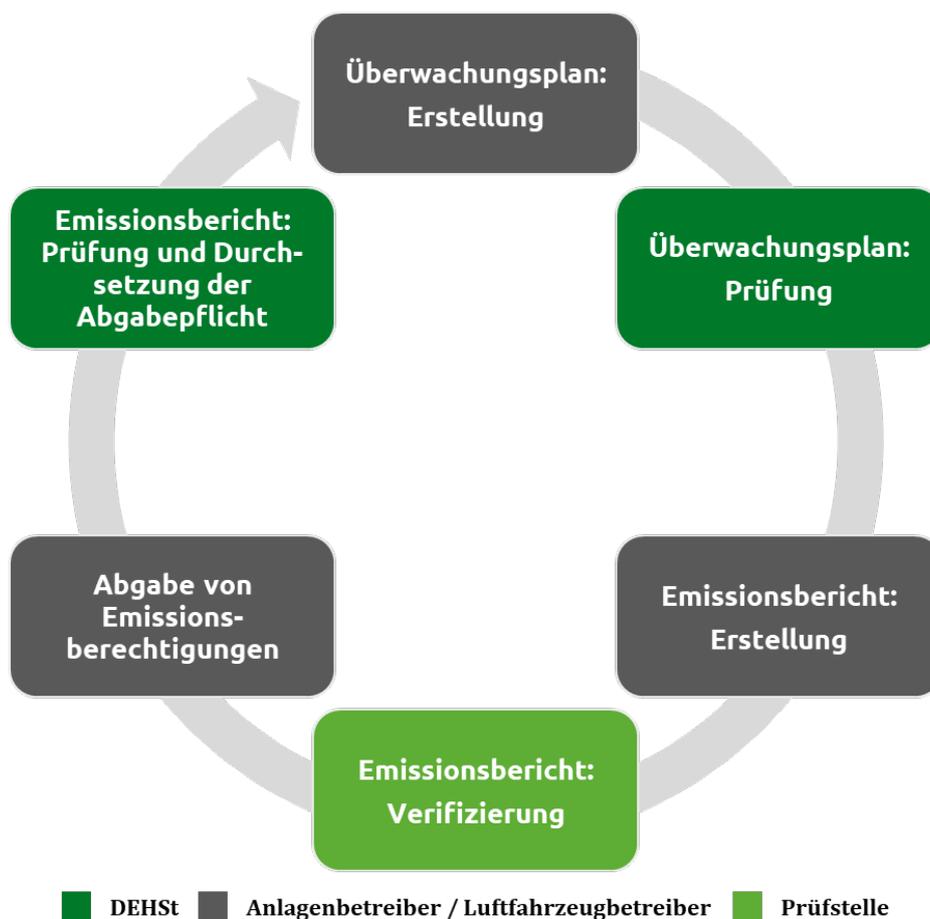
Schritt 5: Eingabe des Aktivierungsschlüssels

Im letzten Schritt überprüft die DEHSt die Identität der kontobevollmächtigten Personen und die bereitgestellten Antragsunterlagen. Bei erfolgreicher Prüfung versendet die DEHSt einen Aktivierungsschlüssel via Post. Dieser ermöglicht die vollständige Aktivierung des Kontos im Unionsregister.

2.3.2 Bewerbungs- und Zuteilungsverfahren

In seiner Umsetzung folgt der Europäische Emissionshandel einem Compliance Model, welches in allen EU-Mitgliedsstaaten gleichermaßen angewendet wird. Das Modell bildet ein sechststufiges Verfahren, welches sich in einem Turnus von einem Jahr wiederholt.

Abbildung 3: Compliance Cycle

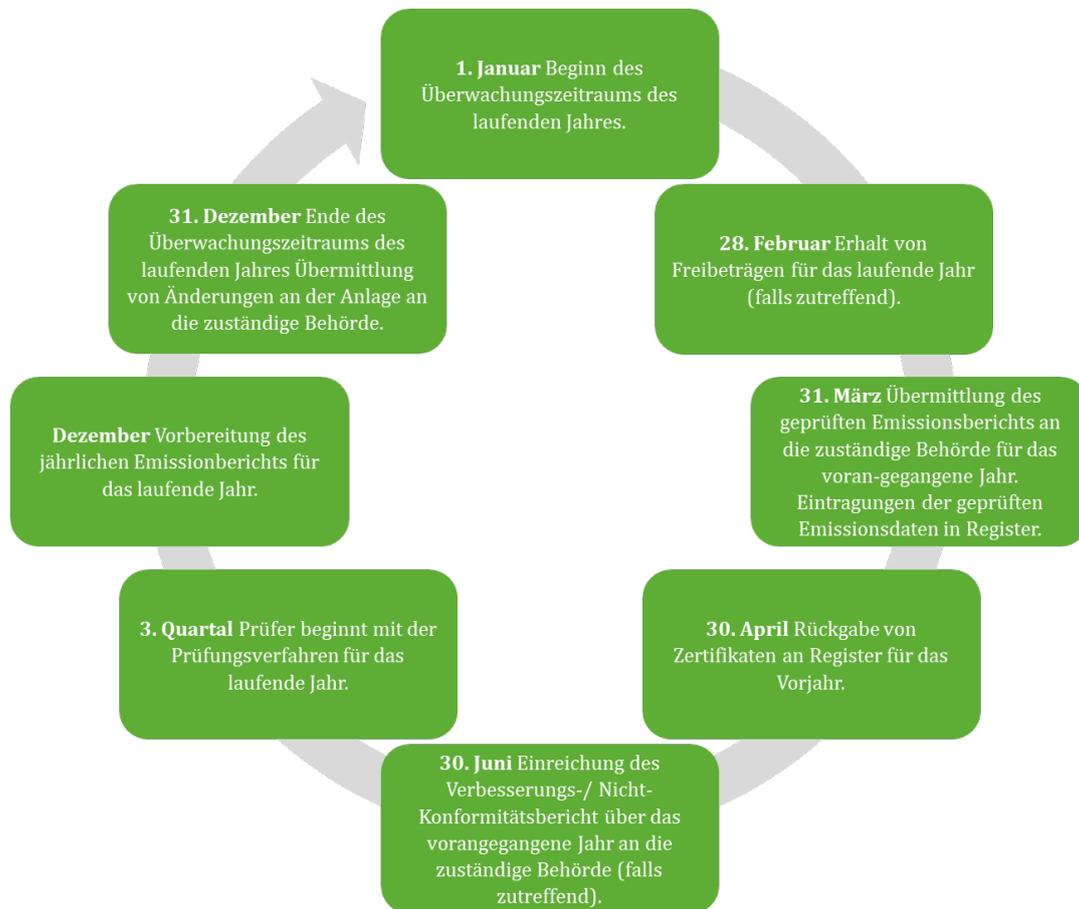


Quelle: (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2015 S. 7)

Zu Beginn des in Abbildung 3 dargestellten Compliance Cycles erstellt der Anlagenbetreiber einen Überwachungsplan für seine(n) Anlage(n), in welchem er seine Methode zur Messung und

Überwachung seines CO₂-Ausstosses beschreibt. Dieser Plan wird durch das zuständige Kontrollorgan, in Deutschland von der DEHSt, geprüft und genehmigt. Im Laufe der Messperiode ist der Anlagenbetreiber dazu verpflichtet, seine Emissionen fortlaufend zu überwachen und zu übermitteln. Zum Abschluss der jährlichen Messperiode erstellt der Anlagenbetreiber einen Emissionsbericht, welcher durch zertifizierte Prüfstellen zu validieren ist, bevor dieser zur finalen Berechnung der Emissionswerte an das DEHSt übergeben werden kann. Auf Basis des eingereichten Berichts, welcher die notwendige Abgabemenge enthält, geben die Verpflichteten die notwendige Anzahl an Emissionsberechtigungen jährlich bis zum 30. April ab. Die DEHSt prüft die Abgabemengen und Emissionsberichte der Anlagenbetreiber und hat die Befugnis fehlerhafte oder unvollständige Angaben und zu wenig abgegebene Emissionsberechtigungen zu ahnden. Eine detaillierte Übersicht der zeitlichen Abfolge des jährlichen Compliance Cycle aus der Sicht eines Anlagenbetreibers ist in Abbildung 4 dargestellt.

Abbildung 4: Detailansicht Compliance Cycle



Quelle: (EU-Kommission, 2015 S. 101)

2.3.3 EUA Transaktionen (Zuteilung, Auktion, Handel)

In diesem Abschnitt stellen wir in Kürze die primären Transaktionen des Europäischen Emissionshandels vor. Diese unterteilen sich in

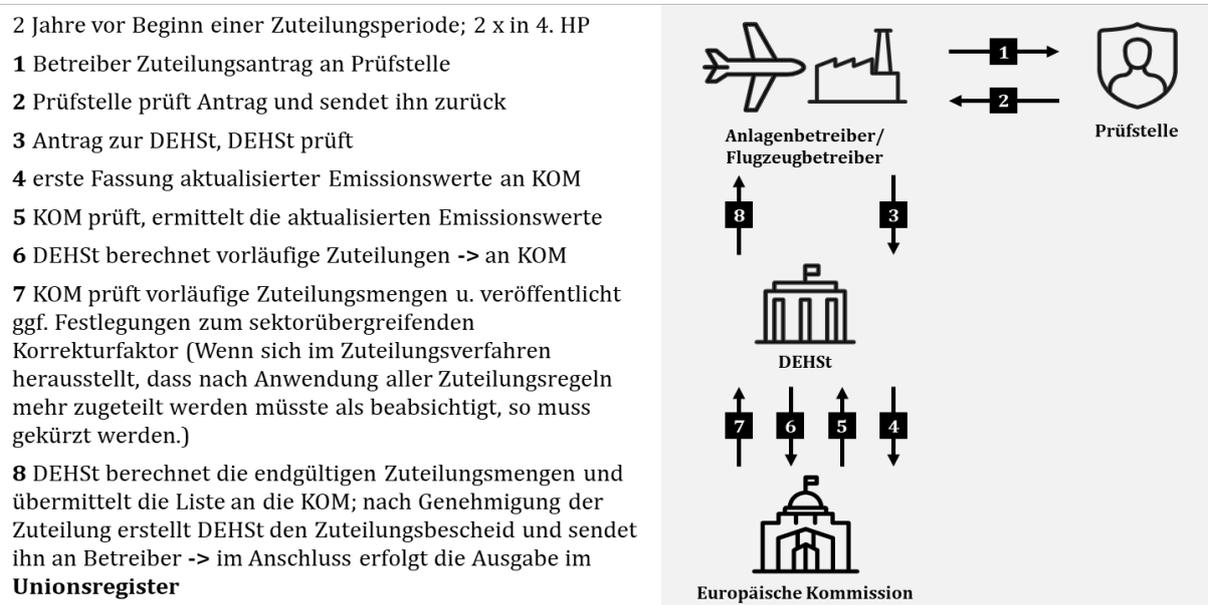
1. jährliche kostenlose Ausgabe von Emissionsberechtigungen
2. den wöchentlich stattfindenden Auktionen von Emissionsberechtigungen und
3. dem Handel von Emissionsberechtigungen an der European Energy Exchange (EEX).

Alle drei Transaktionen repräsentieren Optionen, wie Anlagenbetreiber und Luftfahrzeugbetreiber die für sie notwendigen Emissionsberechtigungen erwerben können.

1 Kostenlose Zuteilung von Emissionsberechtigungen

Die kostenlose Zuteilung von Emissionsberechtigungen beschreibt das Zusammenspiel zwischen Anlagenbetreibern, Prüfstellen, sowie der DEHSt und der Europäischen Kommission bei der Berechnung und Ausgabe von Emissionsberechtigungen. Dies ist in Abbildung 5 exemplarisch dargestellt.

Abbildung 5: Zuteilungsantrag: Aufgaben der Akteure



Quelle: (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2021a)

Sowohl Anlagenbetreiber als auch Luftfahrzeugbetreiber sind dazu aufgefordert ihren Bedarf an Emissionsberechtigungen in Form eines Zuteilungsantrags zu bestimmen. Vor der Einreichung der Zuteilungsanträge bei der DEHSt müssen diese auf Richtigkeit geprüft werden. Dies geschieht durch unabhängige Prüfstellen, welche von den Anlagenbetreibern frei gewählt werden können. Wurde der Zuteilungsantrag korrekt gestellt, so bewilligt die Prüfstelle diesen. Der Anlagenbetreiber übergibt den bewilligten Antrag nun an die DEHSt. In einem mehrstufigen Verfahren prüfen und aktualisieren die DEHSt und die Europäische Kommission nun die zuzuteilenden Emissionsberechtigungen der einzelnen Anlagenbetreibern. Die Zuteilungsanträge der Anlagenbetreiber dienen hierbei als Ausgangsbasis, welche nun auf Basis von Verteilungsschlüsseln neu berechnet werden. Nach der vorläufigen Veröffentlichung der Zuteilungswerte und des sektorübergreifenden Korrekturfaktors durch die Europäische Kommission ist die DEHSt in der Lage, die finale Zuteilung von Emissionsberechtigungen je Anlagenbetreiber vorzunehmen. Diese wird vor dem Versand erneut durch die Europäische Kommission geprüft. Der anschließende Versand der Zuteilungsbescheide erfolgt durch die

DEHSt, im Anschluss erfolgt die Ausgabe von Emissionsberechtigungen auf die Konten der Anlagenbetreiber und Luftfahrzeugbetreiber im Unionsregister.

2 Auktionierung von Emissionsberechtigungen

Auktionen von Emissionsberechtigungen werden durch die DEHSt gesteuert und finden im wöchentlichen Rhythmus statt. Die Auktionstermine können von der Öffentlichkeit auf der Webseite der EEX (<https://www.eex.com/de/maerkte/handel/kalender>, aufgerufen am 11.01.2022) eingesehen werden. Emissionsberechtigungen für Luftfahrzeugbetreiber werden hingegen nur an einem festgelegten Termin im Jahr versteigert. Vor einer Auktion bestimmt die DEHSt den sogenannten „Auction Reserve“ Preis für die einzelne Auktion. Dieser Preis repräsentiert den Mindestpreis, zu welchem die Emissionsberechtigungen final angeboten werden müssen. Wird dieser Preis im Durchschnitt nicht erreicht oder wird nicht die festgelegte Menge an Emissionsberechtigungen versteigert, so wird die Auktion abgebrochen. Auktionen werden als „Single-round, sealed bid and uniform price auction“ durchgeführt und laufen jeweils zwei Stunden. Innerhalb dieses Zeitfensters können durch die Anlagenbetreiber und Händler Eingaben, Änderungen oder auch ein Rückzug aus der Auktion durchgeführt werden. Nach Ablauf des Auktionszeitfensters wird der „Clearing Preis“ berechnet und die angebotenen Emissionsberechtigungen entsprechend den Geboten zugeteilt. Die ECC tritt als Intermediär zwischen den Anlagenbetreibern und der EEX bei der Bezahlung und systemseitigen Zuweisung von Emissionsberechtigungen auf. Sie prüft den Zahlungseingang für die ersteigerten Berechtigungen und passt das interne Register der ECC zur Speicherung der Emissionsberechtigung je Anlagenbetreiber an. Der für die Auktion reservierte Betrag wurde zwei Tage vor der Auktion durch den Zentralverwalter (EU KOM) gemäß Art. 38 RegVo auf das „Sicherheitskonto für die Lieferung versteigelter Berechtigungen“ der ECC übertragen. So werden Berechtigungen, welche zum Beispiel für Deutschland freitags gehandelt und versteigert werden, am darauffolgenden Montag von dem Sicherheitskonto auf das Handelskonto der ECC übertragen. Im Anschluss werden die einzelnen Transaktionen an die Käufer transferiert. Für die beteiligten Akteure (Auktionator für die EU, Polen und Deutschland) verfügt die ECC über unterschiedliche Sicherheitskonten.

3 Handel von Emissionsberechtigungen

Vergleichbar mit Aktien können Emissionsberechtigungen (EUA/ EUAA) von in Deutschland ansässigen Anlagenbetreibern, Luftfahrzeugbetreibern und Händlern an der European Energy Exchange gehandelt werden. Wie bei Auktionen agiert die EEX im Verbund mit der ECC, um den Zahlungsverkehr und die systemseitige Zuweisung von Emissionsberechtigungen zwischen den in den Handel involvierten Parteien sicherzustellen. Die Vorgänge, insbesondere die Information, welche Preise bezahlt wurden, werden in dem internen Register der ECC gespeichert.

2.4 Ergebniszusammenfassung Unionsregister

Zusammenfassend lassen sich die folgenden Hauptmerkmale über das Unionsregister festhalten:

- ▶ Das Unionsregister dokumentiert den Eigentümer der Emissionszertifikate.
- ▶ Das Unionsregister ermöglicht eine nachvollziehbare Historie sämtlicher Übertragungen in Zusammenhang mit den Emissionszertifikaten.
- ▶ Im Unionsregister enthaltene Eintragungen genießen den öffentlichen und rechtlichen Glauben der Richtigkeit und Aktualität der Inhalte und können von Rechtswegen in jedem Fall als verbindlich und korrekt angesehen werden.

- ▶ Die im Unionsregister eingetragenen Inhalte weisen eine hohe Standardisierung auf und jede Erstellung, Veränderung oder Löschung eines Eintrags erfolgt nach einer genauen Prozessabfolge.
- ▶ Einer Erstellung, Veränderung oder Löschung eines Eintrages müssen alle Beteiligten zustimmen (vgl. Konsensprinzip).
- ▶ Die DEHSt ist zuständig für die Richtigkeit und Aktualität der Inhalte im deutschen Teil des Unionsregisters.
- ▶ Die Einsicht in das Unionsregister ist nicht öffentlich, sondern an ein berechtigtes Interesse geknüpft.

3 Integration von DLT in das Unionsregister

Nachdem das vorherige Kapitel den EU-ETS und deren Stakeholder beschrieben hat, beleuchtet dieses Kapitel DLT-basierte Lösungsansätze, die das System effizienter gestalten können. Wie in Kapitel 1 „Zielsetzung und Vorgehen“ beschrieben, wird hierzu eine Bewertungsmatrix genutzt. Diese Bewertungsmatrix wird im nächsten Unterkapitel erläutert. Hierbei wird ebenfalls auf die verschiedenen Blockchain-Konfigurationen und die analysierten Protokolle eingegangen. Die restlichen Abschnitte dieses Kapitels analysieren und vergleichen die Protokolle, um abschließend eine Protokollempfehlung auszusprechen.

3.1 DLT Bewertungsmatrix

Jeder Anwendungsfall für DLT-basierte Systeme hat unterschiedliche Ansprüche. Abhängig von den Ansprüchen an das System kann das bestmögliche Protokoll gewählt werden. Um die Protokolle anhand der Anforderungen auszuwerten, wird eine sogenannte Bewertungsmatrix herangezogen. Diese Matrix listet Kriterien und ihre jeweiligen Gewichtungen nach dem MoSCoW Prinzip¹ in Absprache mit dem UBA auf und wertet aus, inwiefern das Protokoll diese Anforderungen erfüllt. Die Entscheidungskriterien wurden mit Abnahme des Feinkonzeptes festgelegt; sämtliche Kriterien weisen zum jetzigen Zeitpunkt eine hohe Priorität auf ('MUSS'). Anhand dieser Bewertungsmatrix (Tabelle 3) werden die Protokolle anschließend verglichen.

Tabelle 3: Bewertungsmatrix: Entscheidungskriterien vs. Technologien

Kriterium	Ausprägung	Unionsregister
Nutzbarkeit (aus Entwicklersicht) ➔ MUSS	Reifegrad der Technologie Konfigurationsmöglichkeiten Größe der Entwicklergemeinde Wiederverwendbarkeit der Lösung	Der Reifegrad der Technologie spielt eine entscheidende Rolle für die Registerverwaltung. Die DLT hat in diesem Fall in erster Linie eine Archivierungs- und weniger eine Transaktionsfunktion. Wichtig ist die Verwaltung der Schreibrechte und die Nachvollziehbarkeit von aufeinanderfolgenden Maßnahmen, die im Register archiviert werden.
Skalierbarkeit, Performanz ➔ MUSS	Skalierbarkeit Durchsatz Durchlaufzeit	Die Größe des Registers orientiert sich an der Anzahl der Teilnehmer mit ihren individuellen Konten. Der Bedarf für eine hohe Skalierbarkeit kann ausschlaggebend werden, da immer mehr Bereiche in den Emissionshandel aufgenommen werden. Die Anzahl der Benutzer in Deutschland bleibt maximal im sechsstelligen Bereich.
Interoperabilität ➔ MUSS	Orientierung an Standards Offene und klare Schnittstellen	Die Interoperabilität hat eine hohe Relevanz, da zukünftig ein DLT-basiertes europäisches Emissionshandelsregistersystem auch an Emissionshandelsregistersysteme anderer Jurisdiktionen sowie andere Systemkomponenten wie beispielsweise Auktionsplattformen auf Basis von DLTs anbindbar sein sollte, um nahtlose Übertragungen von Emissionsberechtigungen und Informationen zu ermöglichen.

¹ MoSCoW Prioritäten untergliedern Aktivitäten in *must have, should have, could have* und *won't have*.

Kriterium	Ausprägung	Unionsregister
Sicherheit ➔ MUSS	Konsensmechanismus und Verteilung der Knoten Datenschutz Smart Contract-Prüfungen	Der Betrug mit Registereinträgen muss unterbunden werden können. Daher ist die Sicherheit ein wichtiger Aspekt. Außerdem ist die permanente Verfügbarkeit der Architektur kritisch und somit hoch relevant.
Nachhaltigkeit ➔ MUSS	Energieverbrauch Ressourcenschonung Open-Source-Ansatz	Da die Anzahl der Einträge bzw. Änderungen im Registereintrag im Vergleich zu einer Handelsplattform deutlich geringer sind, ist der Energieverbrauch für eine Registerverwaltung geringfügig. Zudem wird nicht auf den energieintensiven Proof-of-Work-Konsensmechanismus zurückgegriffen.
Kosteneffizienz ➔ MUSS	Einmalkosten zur Inbetriebnahme Fixkosten im Betrieb	Da das UBA über öffentliche Gelder finanziert wird, müssen die Kosten verhältnismäßig sein. Die laufenden Kosten sollten die des bisherigen Systems nicht signifikant überschreiten.

3.1.1 Blockchain Konfigurationen

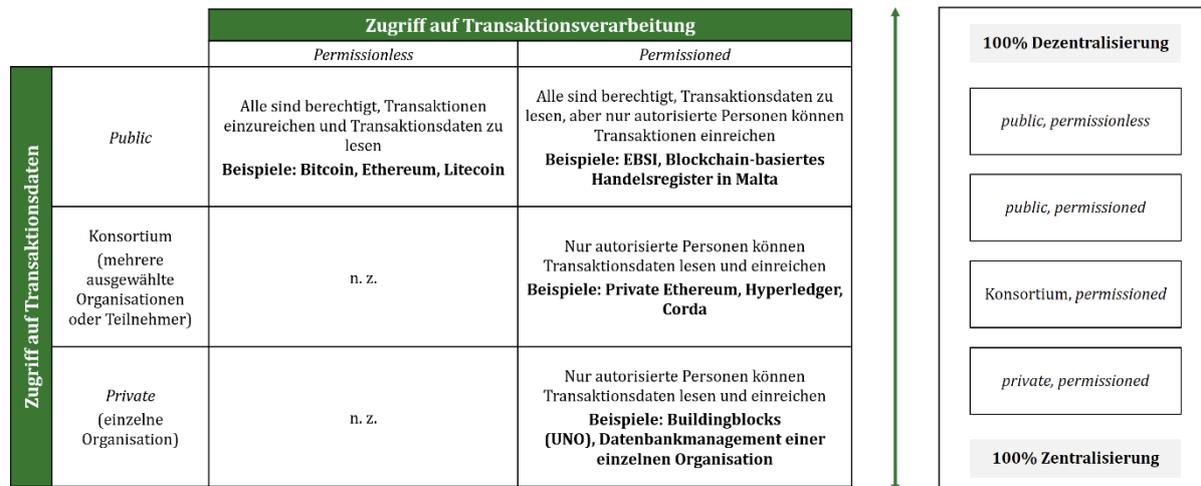
Um die möglichen Vorteile und Potenziale der DLT für das Emissionshandelsregistersystem verstehen und einschätzen zu können, ist eine Erläuterung der Terminologie sowie das grundlegende Verständnis über die Funktionsweise der DLT notwendig. In diesem Unterkapitel werden die möglichen Blockchain-Ausprägungen, sowie die möglichen Konfigurationen eines DLTs vorgestellt.

Die DLT kann ins Deutsche mit verteiltem Hauptbuch übersetzt werden. In einem Hauptbuch werden einzelne Datensätze über Konten und die dazugehörigen Transaktionen fälschungssicher und permanent abgespeichert. Im Gegensatz zu einer klassischen Datenbank erfolgt die Abspeicherung dieser Datensätze nicht zentral an einem Ort, sondern vielmehr verteilt über mehrere sogenannte Knoten (im Englischen "Nodes") in einem Peer-to-Peer (P2P) Netzwerk. Durch die Verteilung der Datensätze hat die DLT im Vergleich zu einer klassischen, zentralen Datenbank einen wesentlichen Vorteil, denn die Verteilung eliminiert den sogenannten Single-Point-of-Failure: Fällt in einem klassischen Client-Server-System die zentrale Datenbank einmal aus, so ist dadurch das gesamte Netzwerk von dem Ausfall betroffen. Dies ist nicht der Fall, wenn die Datensätze in identischer Form bei den Akteuren verteilt liegen. Die Validierung und Durchführung einer bestimmten Transaktion erfolgen in der Gemeinschaft aus dem Netzwerk heraus und nicht durch den Einsatz einer zentralen oder intermediären Instanz.

Wie der Begriff Blockchain es erahnen lässt, werden die relevanten Datensätze in einem DLT System in kryptographisch verkettete und mit Zeitstempel versehene Blöcke zusammengefasst und gespeichert. Jeder neu angelegte Block hat eine eindeutige Referenz zu seinem Vorgängerblock. Durch diese Verkettung der Blöcke ist eine eindeutige chronologische Sequenz bei der Abspeicherung der Datensätze in einer Blockchain gegeben.

Die Konfiguration und damit die inhärente Architektur einer Blockchain variiert je nach Art der Zugriffsberechtigung, Autorisierung und Visibilität. Generell sind Blockchain-Systeme in drei Arten von Kategorien zu unterteilen, nämlich sog. öffentliche Blockchains, Konsortialblockchains sowie vollständig private Blockchains. Die folgende Abbildung 6 fasst die drei Konfigurationstypen visuell zusammen und untermauert die anschließende Diskussion.

Abbildung 6: Überblick der verschiedenen Blockchain-Konfigurationen



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt School Blockchain Center, Capgemini Invent, Datarella

3.1.1.1 Public Blockchains

Public Blockchains sind in ihrer Architektur öffentlich. Im Allgemeinen gewähren öffentliche Blockchains einen öffentlichen und vollständigen Zugriff zum Lesen aller Transaktionen, die auf dem jeweiligen Ledger der zugehörigen Blockchain gespeichert sind. Teilnehmer im Netzwerk können somit sehen, welche anderen Netzwerkteilnehmer zu welchem Zeitpunkt welche Transaktion durchgeführt haben. Unterschiede gibt es jedoch in Bezug auf die Transaktionsverarbeitung, also das Recht, Transaktionen auf die Blockchain zu schreiben und einzureichen.

Der öffentliche Zugang zu Transaktionen, gepaart mit der erlaubnisfreien Möglichkeit (sog. „permissionless“) der Netzwerkteilnehmer, Transaktionen auf der Blockchain einzureichen, wird als vollständig verteilte Blockchains bezeichnet, wie beispielsweise das Bitcoin- oder Ethereum-Protokoll. In diesem Fall kann jeder Netzwerkteilnehmer sehen, welche Transaktionen in der Vergangenheit stattgefunden haben und ist in der Lage, am Validierungsprozess von Transaktionen teilzunehmen: Transaktionen werden nach der Validierung entweder akzeptiert und in einen Block geschrieben oder abgelehnt. Spricht man hingegen von einem öffentlichen Zugriff auf Transaktionen in Verbindung mit der Notwendigkeit, den Zugriff auf den Konsensmechanismus zu beschränken (sog. „permissioned“), wird dem zugehörigen Blockchain-Protokoll ein gewisser zentralistischer Charakter zugeschrieben. Diese Art der Protokollarchitektur kann beispielsweise von öffentlichen Institutionen genutzt werden.

Ein Grund für die eingeschränkte Nutzbarkeit von öffentlichen Blockchains für Unternehmen sind Datenschutzbedenken. So hindert der öffentliche Charakter dieser Art von Konfiguration Unternehmen daran, interne und vertrauliche Daten auf die Blockchain zu speichern. Zudem sind die Konsensmechanismen einiger öffentlicher Blockchains, wie das Bitcoin-Protokoll, das auf dem Proof-of-Work-Konsensmechanismus (PoW) beruht, rechen- und damit auch energieintensiv, was zu hohen Betriebskosten für die Netzwerkteilnehmer führen kann und dann auch erhebliche Umweltauswirkungen hat. Abhängig vom Konsensmechanismus fallen zum Teil auch hohe Transaktionskosten an, was eine Barriere zur Nutzung der Blockchain

darstellt. Zusätzlich bleibt die begrenzte Skalierbarkeit von öffentlichen Blockchains ein Problem für Unternehmen. Um die Skalierbarkeit von öffentlichen Blockchains zu adressieren, wurden in den letzten Jahren diverse Protokolle mit anderen Konsensmechanismen entwickelt, wie z.B. dem Proof-of-Stake (PoS), der u.a. auf Cardano, Cosmos oder Algorand genutzt wird. Dieser alternative Konsensmechanismus ist im Vergleich zu PoW deutlich weniger rechen- und energieintensiv (Voshmgir, 2020).

3.1.1.2 Private Blockchains

Private Blockchains sind Blockchains, bei welchen die Schreibberechtigungen zentralisiert auf eine Organisation gehalten werden. Der zentralisierte Charakter macht diese Konfiguration also zu einer vollständig zugangsbeschränkten (permissioned) Blockchain. Anders als bei öffentlichen Blockchains sind nur wenige, meist unternehmensinterne Instanzen berechtigt, den Transaktionsdatensatz zu lesen und Transaktionen in das Transaktions-Ledger der Blockchain einzureichen. Hier wird das Ledger von einer vordefinierten Gruppe geteilt und validiert, die eine Einladung des Netzwerkerstellers zur Teilnahme am Konsensmechanismus benötigt. Somit hat der Eigentümer der Blockchain die volle Entscheidungsgewalt über die Zusammensetzung der Nodes im Blockchain-Netzwerk. So kann das Unternehmen die Architektur und die Statuten der Blockchain individuell an seine Bedürfnisse anpassen und Sicherheitsmechanismen entschärfen, da sich die Node-Betreiber bereits im Voraus vertrauen. Außerdem ist diese Konfiguration im Vergleich zu öffentlichen Blockchains aufgrund eines vereinfachten und weniger umfangreichen Konsensmechanismus durch vordefinierte Knoten schneller bzw. einfacher, was sie in Bezug auf die Transaktionskosten günstiger und hoch skalierbar macht. Eine Anwendung dieser Art von Konfiguration ist vor allem im firmeninternen Umfeld zu finden (Voshmgir, 2020).

3.1.1.3 Konsortiale Blockchains

Vergleichbar mit einer vollständig privaten Blockchain, gewährt eine Konsortial-Blockchain einen erlaubnispflichtigen (permissioned) Zugang zu Transaktionen und deren Verarbeitung. Der wesentliche Unterschied liegt in der Anzahl der teilnehmenden Parteien. Während eine vollständig private Blockchain von einer einzelnen Gruppe oder einem Unternehmen kontrolliert wird, wird eine Konsortial-Blockchain von einer Vielzahl unabhängiger Parteien, die nicht zur selben Organisation gehören, betrieben und verwaltet, was sie zur relevantesten Konfiguration im Geschäftskontext macht. Das Zusammenspiel der Konsortialpartner wird in der Regel separat und klassisch in einem Konsortialvertrag geregelt. Einige Aspekte aus diesem Vertrag dienen als Grundlage für die sogenannte Governance hinter der Konsortial-Blockchain.

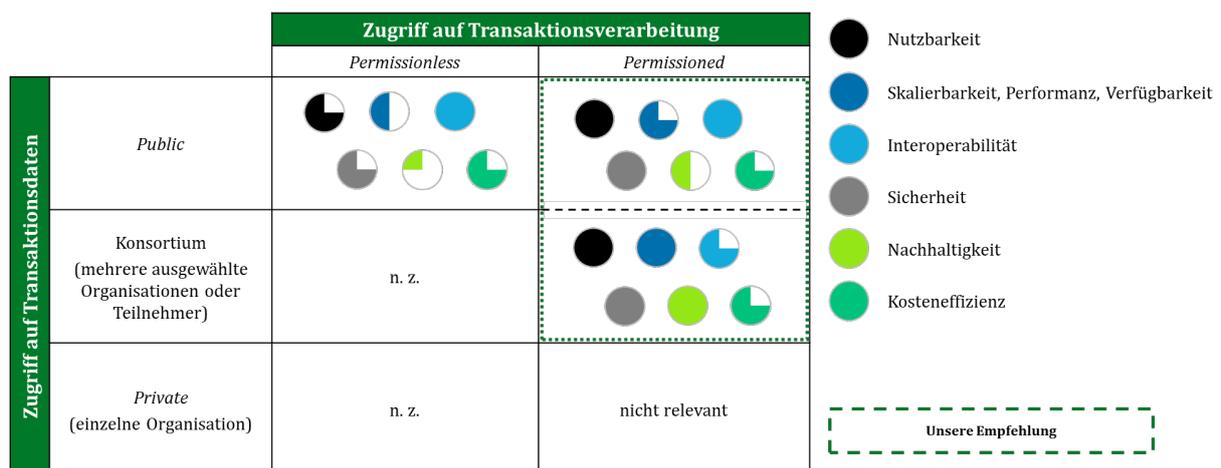
Während unternehmensübergreifende Prozesse aufgrund mangelnder Kompatibilität von unternehmenseigenen Enterprise-Systemen (Enterprise Resource Planning – Software-Tool zum integrierten Management verschiedener Unternehmensgeschäfte basierend auf der Erhebung, Speicherung und Analyse von Daten über Ressourcen und Verpflichtungen in Echtzeit) sowie fehlendem Vertrauen zwischen den Parteien oft schwierig zu implementieren sind, kann der Einsatz einer Konsortial-Blockchain diese Hindernisse überwinden. So bietet diese Konfiguration eine gemeinsam verwaltete und betriebene Plattform für die beteiligten Parteien mit der Eigenschaft der Blockchain-Technologie, Vertrauen aufzubauen, das aus einer gemeinsamen und vorab ausgewählten Menge von Knoten resultiert, die am Konsensmechanismus teilnehmen. Dies führt zu einem geringeren Grad an Zentralisierung im Vergleich zu vollständig privaten Blockchains, da eine größere und vielfältigere Gruppe von

vertrauenswürdigen Knoten am Konsensmechanismus teilnimmt. Die Konsortial-Blockchain kann also als eine Art Hybrid-Konfiguration betrachtet werden, die zwischen einer öffentlichen und einer vollständig privaten Blockchain liegt. In diesem Fall gelten die Vorteile einer vollständig privaten Blockchain, wie z. B. die Möglichkeit der Anpassung, agile Governance, energieeffizienter und damit umweltfreundlicherer Betrieb und eine beschleunigte Transaktionsrate. Anders als bei vollständig privaten Blockchains muss jedoch eine Einigung zwischen den verschiedenen beteiligten Parteien hinsichtlich der Eigenschaften der Zugänglichkeit, Autorisierung und Sichtbarkeit des Netzwerks gefunden werden. So können die Netzwerkteilnehmer entscheiden, ob die Protokollarchitektur jedem erlaubt, die Historie des Ledgers zu lesen, den Lesezugriff nur auf Teilnehmer zu beschränken oder eine hybride Lösung zu entwickeln, wie z. B. die Gewährung des Zugriffs auf verschiedene Segmente des Ledgers über eine Anwendungsprogrammierschnittstelle (API). Darüber hinaus kann z. B. festgelegt werden, welcher Teil der Knoten einen neuen Block bestätigen muss, damit er als validiert und bestätigt gilt (Voshmgir, 2020).

3.1.1.4 Auswahl der Blockchain Konfigurationen

Die Wahl der Blockchain- und DLT-Konfiguration bestimmt wesentlich die Kategorien der Bewertungsmatrix. Um zu untersuchen, welche Blockchain-Konfiguration und somit welches Protokoll bei der näheren Betrachtung für die Umsetzung des Unionsregisters Anwendung findet, soll im Folgenden eine Bewertung der unterschiedlichen Blockchain-Konfigurationen anhand der vorher definierten Kategorien der DLT Bewertungsmatrix stattfinden. Infolgedessen können so die zu untersuchenden Blockchain-Protokolle eingegrenzt und bestimmt werden. Eine Zusammenfassung des Ergebnisses findet sich in Abbildung 7.

Abbildung 7: Einordnung der Blockchain-Konfigurationen



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt School Blockchain Center, Capgemini Invent, Datarella

Jede Blockchain-Konfiguration birgt Vor- und Nachteile. Die Industrie bevorzugt derzeit die public permissioned Protokolle, anstatt der public permissionless oder konsortiale Protokolle. Ein Grund für diesen Trend ist, dass die Interoperabilität mit anderen Blockchains auf public permissioned Blockchains besser gewährleistet ist. Außerdem kann die Blockchain nur von den Parteien betrieben werden, die den zugehörigen Anwendungsfall bearbeiten. Dies reduziert den

Organisations- und Verwaltungsaufwand im Vergleich zu public Blockchains und bildet im Konsortium ein solides Fundament für den Betrieb der Blockchain.

Der Anwendungsfall lässt sich zudem einfacher umsetzen, denn so können Transaktionskosten eliminiert werden, was einen unkomplizierteren Prozessfluss ermöglicht. Zudem erlauben private Netzwerke sich besser an klassische Identitätsmodelle wie Username und Passwort anzulehnen.

Den Betreibern erlaubt ein privates Netzwerk die Anwendungsfälle zu erweitern, beispielsweise durch die Integration eines anderen ETS. Hierbei kann die jeweilige Logik des ETS in der Blockchain nachgebildet und mit der Logik des bestehenden ETS verknüpft werden. Dadurch könnte unter anderem der direkte Handel von Emissionsberechtigungen von ETS-1 und ETS-2 abgebildet werden.

Aus Sicht der Auftragnehmer muss die Interoperabilität eines DLT-basierten Unionsregister zukünftig gewährleistet sein, da neue Anwendungsfälle wie z.B. dezentraler CO₂-Handel oder eine EU-weite Vernetzung der Systeme analysiert und implementiert werden könnten. Daher fokussiert sich diese Studie auf public permissioned Netzwerke bzw. konsortiale Blockchains.

Weltweit existiert eine Vielzahl an public permissioned Netzwerken und es läge außerhalb dieser Studie alle Protokolle miteinander zu vergleichen. Um die Analyse übersichtlich zu gestalten, wurden vorab die robustesten Protokolle mit der größten Reichweite und dem höchsten Ansehen ausgewählt. Diese Netzwerke werden anhand der Bewertungsmatrix analysiert, um das optimale Protokoll für das Unionsregister auszuwählen.

3.1.2 Zu betrachtende Blockchain-Protokolle

Innerhalb der DLT-Bewertungsmatrix wird eine Auswahl an Blockchain-Protokollen für die Umsetzung eines DLT-basierten Unionsregisters betrachtet und deren Eignung analysiert. Basis für die Auswahl der zu betrachtenden Protokolle ist die zuvor erfolgte Auswahl der Blockchain-Konfigurationen in Kapitel 3.1. Basierend auf der erfolgten Empfehlung, zugriffsbeschränkte (permissioned) und öffentliche oder konsortiale Blockchain-Protokolle für die Umsetzung eines DLT-basierten Unionsregisters zu verwenden, wird sich die weitere Betrachtung auf Protokolle aus diesen Bereichen beschränken.

3.1.2.1 Ethereum

Ethereum wurde als zugangsfreie, öffentliche Blockchain zum Wertetransfer entwickelt, in der Smart Contracts und dezentrale Anwendungen (Apps), vornehmlich mit der eingebauten Programmiersprache Solidity, programmieren werden können. Hierfür wird eine Virtual Machine (VM) auf der Blockchain bereitgestellt, für deren Nutzung im öffentlichen Mainnet abhängig von der benötigten Rechenleistung Transaktionskosten anfallen. Die Technologie wurde zum ersten Mal 2015 der Öffentlichkeit vorgestellt und seine native Währung Ether (ETH) stellt Stand Januar 2022 nach Bitcoin die Kryptowährung mit der zweitgrößten Marktkapitalisierung dar. Neben der public permissionless Version von Ethereum, die auch als Ethereum Mainnet bezeichnet wird, haben viele Unternehmen die gleiche Technologie benutzt, um private permissioned Ethereum Netzwerke aufzusetzen. Ein Beispiel hierfür ist das Building Blocks System des Welternährungsprogramms (WFP) der Vereinten Nationen, welche eine private permissioned Ethereum-Blockchain nutzt, mit welcher es die Kosten von Cash Transfer Programmen um bis 98% verringern konnte (Diedrich, 2016; Höfelmann, et al., 2019).

Programmiersprache

Die meistgenutzte Programmiersprache für Ethereum ist Solidity. Solidity ist eine Programmiersprache zur Umsetzung von Smart Contracts, welche auf der Ethereum-Blockchain

ausgeführt werden sollen. Die auf der Ethereum Virtual Machine (EVM) implementierte Programmiersprache basiert auf C++, Python und Java Script. Soliditys Vorteil gegenüber anderen Programmiersprachen liegt in der einfachen „Verständlichkeit und Umsetzung“ (Höfelmann, et al., 2019).

„Es besteht zudem auch eine Go-Implementierung zum Schreiben von Ethereum Smart Contracts, jedoch sind in Go geschriebene Programme nicht direkt auf der EVM implementierbar. Programmierer müssen sogenannte Compiler schreiben, um Smart Contracts von Go in EVM-Bytecode umwandeln zu können.“ (Höfelmann, et al., 2019)

Architektur

In der offenen und zugangsfreien Version von Ethereum kann jeder Entwickler dezentrale Anwendungen erstellen und mit der Blockchain interagieren. Die Benutzer verwenden DApps DApps, um mit der Blockchain zu interagieren. Miner erstellen Blöcke, in denen Benutzertransaktionen gehasht und validiert werden (Diedrich, 2016).

3.1.2.2 Hyperledger Fabric

Hyperledger Fabric, im Folgenden auch Fabric genannt, ist ein zugangsbeschränktes Ledger und wird häufig für Konsortialblockchains verwendet. Die grundlegende „Architektur von Fabric basiert auf mehreren Ledgern, deren Operationen voneinander unabhängig sind. Dennoch gibt es ein Adressierungssystem, das es einer Transaktion eines Ledgers erlaubt, die Transaktionen und Smart Contracts eines anderen Ledgers zu sehen und zu adressieren. [Hyperledger] bietet eine erweiterbare und modulare Architektur, die für verschiedene Bereiche eingesetzt werden kann und somit unabhängig von einem bestimmten Anwendungsbereich ist.“ (Höfelmann, et al., 2019).

Programmiersprache

Verträge im Hyperledger werden als Chaincode bezeichnet. Hyperledger unterstützt das Schreiben von Chaincode in Golang oder Java. Die Chaincode-Unterstützung für Java ist in Beta. „Die Chaincodes werden schließlich in einem Docker-Container ausgeführt.“ (Höfelmann, et al., 2019)

Architektur

Hyperledger Fabric ist ein Blockchain-Framework der Linux Foundation und wurde in 2015 veröffentlicht. Hinter dieser Initiative verbergen sich die Unternehmen IBM, Intel und SAP.

„Die Zugangsbeschränkung von Fabric sowie die validierenden und nicht-validierenden Nodes werden durch den oder die Betreiber des Netzwerkes festgelegt. Je nach Bedarf kann der Betreiber des Netzwerkes unterschiedliche Zugangsrechte an Nutzer verteilen, um die erforderlichen Transaktionen im Rahmen des Netzwerkes durchführen zu können. Der zugangsbeschränkte Charakter von Fabric ergibt sich aus dem Bedürfnis der Nutzer nach Privatsphäre. Die Privatsphäre gilt allerdings nicht gegenüber Regulierungsbehörden, diese besitzen die Möglichkeit zur Identifizierung und Überprüfung. Die Verschlüsselung z.B. der Identität erfolgt daher so, dass sie vor anderen unerwünschten Teilnehmern verborgen bleibt, aber von z.B. Regulatoren eingesehen werden kann.

Fabric benötigt vor allen Transaktionen ein kryptografisches Zertifikat, das die vertraulichen Daten eines Benutzers beinhaltet und im Netzwerk registriert ist. Aus jeder Identität kann das Protokoll Sicherheitsschlüssel generieren, mit denen die Mitglieder im Netzwerk Transaktionen durchführen können. Die Identitäten der Transaktionspartner sind verborgen, um die Privatsphäre innerhalb des Netzwerkes zu sichern.

Innerhalb von Fabric entsteht die Vertraulichkeit der Inhalte dadurch, dass Transaktionen so verschlüsselt werden, dass nur die Beteiligten sie entschlüsseln und ausführen können. Fabric bietet mit „Channels“ eine Lösung an: Bestimmte Benutzer kommunizieren in einem Sub-Netzwerk, auf das nur berechnete Benutzer Zugriff haben. Darüber hinaus kann eine (durch einen oder mehrere Smart Contracts realisierte) Geschäftslogik auch kryptografisch gesichert werden (wenn die Vertraulichkeit von ihren Stakeholdern verlangt wird), sodass sie erst zu einem bestimmten Zeitpunkt geladen und entschlüsselt wird.“ (Höfelmann, et al., 2019).

3.1.2.3 Cosmos Netzwerk

Das Cosmos Netzwerk bezeichnet sich als das “Internet der Blockchains”. Der Grundgedanke dabei ist, Interoperabilität zwischen mehreren unabhängigen Blockchains des gleichen Frameworks zu erzielen, anstatt sich auf die Skalierung einer einzigen Blockchain zu fokussieren.

Das Cosmos Netzwerk stellt daher nicht nur eine einzige Blockchain dar, sondern möchte eine sichere, performante und übergreifende Infrastruktur bieten, um mehrere souveräne Blockchains zu einem großen Netzwerk zu vereinen. Mit dem Framework “Cosmos SDK” können eigenständige Blockchains erstellt, mit Anwendungen ausgestaltet und an andere eigenständige Blockchains angebunden werden. So kann ein eigenes Distributed Ledger mit Validatoren nach individuellen Anforderungen bestimmt und z.B. mit einer eigenen Governance ausgestattet werden, weshalb mit Cosmos ein Höchstmaß an Souveränität erzielt werden kann. Mit dem Modul “IBC” (Inter-Blockchain Communication Protocol) erfolgt die Verbindung zu anderen Blockchains. Mit dem Tendermint Konsensmechanismus, der häufig als Proof-of-Stake angewendet wird, werden Transaktionen validiert, bevor sie in die Blockchain geschrieben werden.

Das Cosmos Netzwerk wurde 2014 gegründet und startete 2019 sein Mainnet. Die Marktkapitalisierung liegt derzeit bei ungefähr 140 Mrd. \$. Drei der bekanntesten Blockchains, die auf der Cosmos SDK basieren, sind “Cosmos” und “Terra” und die Blockchain der dezentralen Börse “Osmosis”. Eine mit Cosmos SDK entwickelte Blockchain kann je nach Bestimmung ihrer Validatoren als public permissionless oder private permissioned konfiguriert werden. Von der Definition der Validatoren hängt daher ab, ob der Konsensmechanismus eher dem Prinzip des Proof-of-Stake oder des Proof-of-Authority entspricht (Cosmos, 2021).

Programmiersprache

Für die Entwicklung einer Blockchain in Cosmos gibt es das Cosmos SDK. Es handelt sich dabei um ein Framework für Entwickler. Das Cosmos SDK wurde in Golang programmiert. Mit dem ABCI-Protokoll kann jedoch jegliche gängige Programmiersprache (Java, C++, Go etc.) genutzt werden, um eine Blockchain-Anwendung mit dem Cosmos SDK aufzusetzen. Das Cosmos SDK gilt dank seiner Modularität als besonders entwicklerfreundlich. Ebenso gibt es Module, die andere Programmiersprachen unterstützen, wie Ethermint, welches erlaubt, Smart Contracts, die in Solidity geschrieben wurden, aus EVM-basierten Blockchains wie Ethereum einfach zu integrieren (Cosmos, 2021).

Architektur

Mit der Cosmos SDK lässt sich die Applikationsschicht erstellen, d.h. die Ausgestaltung der Logiken anhand spezifischer Anforderungen, denen die Blockchain genügen soll. Unter anderem können hier Themen zur Governance, dem Staking und die Interaktion mit anderen Blockchains spezifiziert werden. Dabei kann jede Blockchain, die mit der Cosmos SDK entwickelt wurde als sogenannter Hub und als Anknüpfungspunkt z.B. für andere Blockchains fungieren.

Das IBC Protokoll sorgt für die Interoperabilität zwischen den Blockchains im Cosmos-Netzwerk. Die Entwicklung des IBC wurde 2021 fertiggestellt und ermöglicht die Kommunikation verschiedener Blockchains miteinander. Auf diese Weise können verschiedene Token zwischen den angebundenen Blockchains ausgetauscht werden und sogar Smart Contracts von anderen Blockchains ausgehend aufgerufen werden. Anstelle vieler Bridges, die jede Blockchain zu einer anderen Blockchain einrichten müsste, bedarf es bei Cosmos lediglich einer Anbindung an das übergeordnete Cosmos-Netzwerk. Das standardisierte Verbindungsmodul "IBC" erlaubt schnellere, günstigere und komplexere Verbindungen mit anderen Cosmos-basierten Blockchains, als dies mit anderen Arten von Blockchains abzubilden wäre. Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie bietet sich daher durch das Cosmos-Netzwerk eine große Möglichkeit zur horizontalen Skalierung. Verschiedene ETS könnten eine eigene Cosmos-basierte Blockchain mit eigenen Emissionsberechtigungen besitzen. Mit dem standardisierten IBC Protokoll wäre es möglich, Emissionsberechtigungen in oder aus anderen Blockchains zu integrieren. So könnten beispielsweise Emissionsberechtigungen aus dem EU-ETS im japanischen ETS gehandelt werden, oder andersrum. Dies eröffnet neue Wege des Emissionshandels (Cosmos, 2021).

3.2 Anforderungen an DLT Unionsregister

Ziel eines DLT-basierten Unionsregisters ist es, derzeitige Arbeitsabläufe zu automatisieren und effizienter zu gestalten. Dabei soll die Transparenz und Fälschungssicherheit der im DLT Unionsregister abgespeicherten Daten und der Schutz personenbezogener Daten gewährleistet werden. Manuelle Datenabgleiche sowie manuelle Dateneingabe sollen auf ein Minimum reduziert werden. In Absprache mit dem UBA müssen personenbezogene Daten, Daten über die Anlage und Daten über Luftfahrzeugbetreiber und der Überwachungsplan im Unionsregister festgehalten werden. Tabelle 4: Anforderungen an das DLT-basierte Unionsregister listet die Datenattribute, die im Unionsregister zu hinterlegen sind, auf.

Zusätzlich muss ein DLT-basiertes Unionsregister die Compliance Daten eines jeden Kontos speichern. Zu diesen Attributen gehören die geprüften Emissionen pro Jahr, der Compliance-Status als auch der Erfüllungswert. Der Kontostand muss ebenfalls im Unionsregister abzurufen sein (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2020b).

Tabelle 4: Anforderungen an das DLT-basierte Unionsregister

Personenbezogene Daten	Daten über die Anlage	Daten über die Luftfahrzeugbetreiber und Überwachungsplan
Die personenbezogenen Daten, die von den Nationalverwaltern erhoben und weiterverarbeitet werden, beziehen sich auf den Kontoinhaber (insofern es sich bei den Kontoinhabern um natürliche Personen handelt) oder den Kontobevollmächtigten sowie weitere Vertretungsberechtigte des Kontoinhabers (insofern es sich bei den Kontoinhabern um juristische Personen handelt). Die personenbezogenen Daten sind:	Kontonummer Anlagenname Kontoöffnungsdatum	LfzB-Nr. Individueller Code gemäß der Verordnung (EG) Nr. 748/2009 Rufzeichen (ICAO-Kennung)
Name und Vorname	Ggf. Kontoschließungsdatum	DEHSt Aktenzeichen (Überwachungsplan-Nr.)

Personenbezogene Daten	Daten über die Anlage	Daten über die Luftfahrzeugbetreiber und Überwachungsplan
Nummer des Ausweisdokuments	Kontoinhaber-ID	Status des Überwachungsplans
Geburtsdatum und Geburtsort	Umsatzsteueridentifikationsnummer	Überwachungsplan erstes Jahr der Anwendung
Berufliche Anschrift	Anlagennummer / Luftfahrzeugbetreibernummer	Ggf. Überwachungsplan letztes Jahr der Gültigkeit
Berufliche Kontaktdaten	DEHSt-Aktenzeichen	Erstes Jahr der Prüfung
Telefon und Faxnummer sowie Mobilfunknummer	Status	-
E-Mail-Adresse	Datum Beginn Emissionshandelspflicht	-
Titel und berufliche Funktion	Ggf. Datum Ende Emissionshandelspflicht	-
Gültigkeitsdatum des Ausweisdokuments	Ggf. Datum Widerruf Emissionshandelspflicht	-
Nachweis über die Eröffnung eines Bankkontos	Erstes Jahr der Prüfung	-
Akkreditierungsnachweis der Prüfstelle (nur für Prüferkonten)	Ggf. Letztes Jahr der Prüfung	-
Ggf. Vollmacht des Kontoinhabers zur Ernennung einer natürlichen Person zum Kontobevollmächtigten	Aktivitätstyp (Tätigkeit)	-
Einige Daten werden vom Nationalverwalter über bestimmte Unterlagen erhoben. Allerdings werden die betreffenden Unterlagen nach erfolgter Prüfung vernichtet oder die Daten werden somit nicht gespeichert. Zu diesen Unterlagen zählen:	Zugeordnete Prüfstelle und Prüfer	-
Nachweis der Anschrift des ständigen Wohnsitzes	-	-
Führungszeugnisse	-	-

Die Daten werden direkt von der betroffenen Person erhoben und die Bereitstellung dieser Daten ist verpflichtend, um im Unionsregister registriert zu werden. Das UBA erhebt keine Daten, die unter Artikel 9 der Verordnung (EU) 679/2016 fallen. Quelle: (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2021c)

3.3 Gegenüberstellung von Anforderungen und Eigenschaften der DLT Versionen

Wie in Kapitel 3.1.1 erläutert, werden die Protokolle anhand der Bewertungsmatrix miteinander verglichen, um das Protokoll auszuwählen, welches die Ansprüche an die Anforderungen eines Emissionshandelsregisters zum Zeitpunkt des Verfassens am besten abdeckt. Die Bewertung wird anhand eines Ampelsystems (grün, gelb, rot) durchgeführt.

Das Public Ethereum Protokoll ist im Bereich Nutzbarkeit als grün, bzw. gut klassifiziert. Die Entwicklerbasis vom Ethereum Netzwerk ist weltweit das größte, mit ca. 2.300 aktiven Entwicklern monatlich². Durch die Größe des Netzwerkes und die Kryptografie ist das Netzwerk sicher. Außerdem ist das Public Ethereum Netzwerk ein offenes Protokoll, sodass Interoperabilität gewährleistet ist. Zwar ist Public Ethereum ein erweiterbares Netzwerk durch sogenannte Layer-2 Rollups, allerdings schneidet Cosmos aufgrund des Rückgriffs auf das IBC-Protokoll im Vergleich deutlich besser ab, weshalb Public Ethereum nur einen mittleren Score bei der Interoperabilität erhält.

Die Skalierbarkeit der Public Ethereum-Blockchain ist prinzipiell gegeben und schneller als andere Netzwerke, wie z.B. das Bitcoin Netzwerk. In den vergangenen Monaten, in denen die Nutzung und die Anzahl der Applikationen auf Ethereum deutlich zugenommen hat, sind die Transaktionsgebühren jedoch stetig gestiegen. Die Transaktionsgebühren (genannt "gas fees") stiegen so stark, dass kleinere Transaktionen unwirtschaftlich wurden. Daher schneidet das Public Ethereum Netzwerk im Bereich der Skalierbarkeit mit einer zwei ab. Die hohen Transaktionsgebühren schlagen sich auch in der Bewertung der Kosteneffizienz nieder.

Das Protokoll basiert derzeit auf dem energieintensiven Proof-of-Work Konsensmechanismus, welcher signifikante Rechenleistung fordert und Ineffizienzen mit sich bringt, weil Validatoren von neuen Transaktionen Prüfsummen errechnen, um das Netzwerk u.a. vor Spam zu schützen. Diese Situation wird durch den Umstand erschwert, dass derzeit ca. 7000 Nodes existieren, die alle gleichzeitig am Validierungsprozess teilnehmen. Daher ist die Skalierbarkeit, sowie die Nachhaltigkeit und Kosteneffizienz als rot eingestuft. Ein Upgrade des Konsensmechanismus in Richtung Proof-of-Stake ist aktuell in Entwicklung und soll als Ethereum 2.0 zeitnah veröffentlicht werden. Ein genauer Zeitpunkt für diesen Release ist aktuell noch nicht bekannt ebenso wie die genauen Effekte auf Transaktionskosten.

Im Gegensatz zu dem offenen Public Ethereum Netzwerk ist das Private Ethereum Netzwerk für Externe grundsätzlich nicht zugänglich. Es ist ebenso sicher und entwicklerfreundlich wie das Public Netzwerk sowie ähnlich interoperabel. Der Unterschied zwischen Public und Private Ethereum in Hinblick auf die Interoperabilität ist, dass im Private Ethereum Netzwerk diverse "bridges" zu anderen Netzwerken noch nicht existieren. Das Private Netzwerk ist nicht mit den gleichen Skalierungsbeschränkungen konfrontiert wie das Public Ethereum Protokoll. Daher ist es weniger energieintensiv und kosteneffizienter. Zudem kann das Private Ethereum Netzwerk optional auf Daten des Public Netzwerkes zugreifen und steigert somit die Interoperabilität. Aus diesen Gründen ist das Private Ethereum für konsortiale Vorhaben in einem geschlossenen Umfeld mit eingeschränktem Zugang für Außenstehende oftmals besser geeignet als das Public Ethereum.

Cosmos ist im Vergleich zu den anderen genannten Protokollen relativ jung. Aufgrund der technischen Implementierung weist Cosmos viele Vorteile auf, weshalb es im Laufe der Anfertigung der Machbarkeitsstudie stark an Bedeutung gewonnen hat. Vor allem im Bereich der Interoperabilität hat Cosmos neue Maßstäbe gesetzt, da es Entwicklern erlaubt, verschiedene Blockchains auf der gleichen Infrastruktur aufzusetzen und somit dafür sorgt, dass die Blockchains nahtlos untereinander kommunizieren können. Cosmos setzt nicht auf den Konsensmechanismen Proof-of-Work sondern wahlweise auf Proof-of-Stake oder Proof-of-Authority, was eine hohe Anzahl an Transaktionen erlaubt und für Skalierbarkeit sorgt. Die Transaktionskosten sind zudem gering, was sich positiv auf die Kosteneffizienz auswirkt. Den Aspekt der Sicherheit kann der Entwickler im Cosmos Protokoll freier gestalten als auf anderen

² <https://decrypt.co/66740/who-are-the-fastest-growing-developer-communities-in-crypto>

Plattformen. Der Grund dafür ist, dass der Entwickler mit dem SDK die Governance-Architektur selbst festlegen kann. Die Nutzbarkeit der Cosmos Plattform ist zwar durch das SDK und die IBC Funktionalität für Entwickler gegeben, allerdings bietet Cosmos noch keine voll ausgereifte Lösung für Non-Fungible Tokens (NFT) an, welche für die Machbarkeitsstudie fundamental wichtig sind (siehe dazu Kapitel 4). Durch die Integration von Ethermint wäre es jedoch möglich, eine sehr ähnliche Infrastruktur wie auf Ethereum zu schaffen.

Hyperledger Fabric ist ein privates Protokoll, bei dem ein Wahlsystem genutzt wird, um Transaktionen zu bestätigen. Durch diese Zentralisierung ist die Lösung gut skalierbar, nachhaltig und kosteneffizient. In diesen drei Kategorien schneidet Hyperledger Fabric mit gut (gelb) ab. Die Nutzbarkeit von Hyperledger Fabric ist im Vergleich zu öffentlichen Protokollen gemindert, da die Entwicklerbasis kleiner ist. Die Architektur von Hyperledger Fabric erlaubt derzeit nur eine geringe Interoperabilität. Selbst innerhalb des Netzwerkes ist der Austausch innerhalb der 12 Blockchains nur in Maßen gegeben. Der Datenaustausch mit anderen Protokollen, vor allem den öffentlichen, ist derzeit limitiert. Daher schneidet Hyperledger Fabric im Bereich der Interoperabilität mit rot ab.

Abbildung 8: Bewertung DLT-Protokolle

DLT-Protokoll Bewertungs- kriterium	Public Ethereum	Private Ethereum	Cosmos	Hyperledger Fabric
Nutzbarkeit	9/10	9/10	6/10	5/10
Skalierbarkeit, Performanz	2/10	10/10	9/10	5/10
Interoperabilität	6/10	5/10	10/10	4/10
Sicherheit	10/10	9/10	9/10	7/10
Nachhaltigkeit	1/10	9/10	9/10	7/10
Kosteneffizienz	1/10	9/10	9/10	7/10

Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt School Blockchain Center, Capgemini Invent, Datarella

Abschließend sind noch die Ambitionen der Europäischen Union im Blockchain-Bereich zu erwähnen. Die EU rief die European Blockchain Service Infrastructure (EBSI) ins Leben, um ein europäisches Netzwerk für digitale Services für den öffentlichen Sektor zu schaffen. Bisher unterstützt EBSI die folgenden Anwendungsfälle: Notarisierung, Self-Sovereign Identities, digitale Zertifikate von Diplomen und die sichere Datenweiterleitung an Dritte (z.B. Informationen über die zu zahlende Mehrwertsteuer an die Steuerbehörde). Zukünftig sollen die Anwendungsfälle um einen digitalen Pass, Asylanträge und Unterstützung für kleine bis mittelständige Unternehmen erweitert werden. EBSI ist als public permissioned Blockchain aufgesetzt, so dass Nodes von der Europäischen Kommission und den europäischen Mitgliedsstaaten verwaltet werden. Teilnahme an dem Netzwerk wird der Privatwirtschaft und der Zivilbevölkerung gestattet. Zum jetzigen Zeitpunkt³ besteht das EBSI Netzwerk aus 25

³ Stand 16.12.2021

Nodes. Für den Anwendungsfall dieser Studie hat das EBSI Netzwerk noch nicht die ausreichende Größe und Anzahl der Anwendungsfälle erreicht. Daher ist es in der Bewertungsmatrix nicht inkludiert. Allerdings sollte das Umweltbundesamt über die EBSI Initiative informiert sein und den Entwicklungen folgen, für den Fall, dass es sich in Zukunft als sinnvoll erweisen könnte, sich diesem Netzwerk anzuschließen.

Das Ergebnis dieses Vergleichs ist in Abbildung 8 zu sehen.

3.4 Empfehlung für ein Protokoll

Anhand der vorhergehenden Analyse ist es möglich, eine Protokollempfehlung für ein Emissionshandelsregister abzugeben. Diese Empfehlung basiert zum einen auf der Bewertungsmatrix aus Kapitel 3.1 und zum anderen auf der Priorisierung nach dem MoSCoW Prinzip.

Wie in Abbildung 9 zu erkennen ist, sind die Protokolle **Private Ethereum** und **Cosmos** ähnlich gut bewertet. Die Entscheidung, welches Protokoll für die Machbarkeitsstudie zu wählen ist, ist daher zum einen von der Gewichtung der Faktoren als auch von dem technologischen Reifegrad der Technologie abhängig.

Ethereum ging im Juli 2015 live und war damit die erste Plattform, die Smart Contracts und Decentralized Apps ermöglichte. Seither wurden immer wieder neue Protokolle entwickelt, die Schwachstellen in Ethereum adressieren sollten. Trotz des immensen Wettkampfes hat Ethereum es geschafft, sich zum einen weiterzuentwickeln und zum anderen hat Ethereum durch seinen Pioniervorteil eine enorme Netzwerkgröße erreicht, sodass Ethereum als Blockchain-Infrastruktur nicht mehr wegzudenken ist. Das Cosmos-Netzwerk hingegen ist 2019 live gegangen. Die Technik ähnelt der Funktionalität von Ethereum, da die Plattform auch die Entwicklung und Bereitstellung von Smart Contracts und Decentralized Apps unterstützt. Zudem adressiert Sie auch einige Schwachstellen in der Ethereum-Blockchain, vor allem im Bereich der Interoperabilität. Die Marktkapitalisierung und Entwicklergemeinschaft ist jedoch deutlich geringer als bei Ethereum.

Die primären Unterschiede der beiden Netzwerke werden im Folgenden erläutert:

- ▶ **Anpassbarkeit:** Das Cosmos-Protokoll ist anpassbarer als das Ethereum-Protokoll, da Cosmos modularer aufgesetzt ist. Dies bedeutet, dass dezidierte Blockchains und Module für bestimmte Funktionalitäten entwickelt wurden. Zum Beispiel existiert in Cosmos eine Blockchain ausschließlich als dezentrale Börse für Cosmos SDK-basierte Coins.
- ▶ **Reifegrad:** Das Ethereum Netzwerk ist deutlich älter als das Cosmos Netzwerk. Dementsprechend sind die Anzahl der Entwickler und der technologische Reifegrad höher. Im Private Ethereum existiert die Funktionalität, NFTs nach weit verbreiteten Standards zu generieren. Diese Funktionalität existiert in dem Cosmos Netzwerk noch nicht in dieser Form, sondern befindet sich noch im Anfangsstadium.
- ▶ **Governance:** Im Vergleich zu Private Ethereum ist die Governance auf Cosmos flexibler, da die Entwickler eine neue und eigene Blockchain für einen spezifischen Nutzen erstellen können. Dies bedeutet, dass Kontrollfunktionen gezielter verteilt werden können.
- ▶ **Interoperabilität:** Die Interoperabilität des Cosmos-Netzwerkes überzeugt durch das IBC Protokoll. Dies erlaubt den verschiedenen Blockchains im Cosmos-Netzwerk miteinander zu kommunizieren und Daten auszutauschen. Dies ist vor allem relevant für den Fall, dass

andere Staaten auch ein Blockchain basiertes System aufsetzen und die Systeme untereinander leicht miteinander kommunizieren sollen.

Basierend auf der vorhergehenden Analyse, sind das Private Ethereum und Cosmos Netzwerk die Favoriten dieser Machbarkeitsstudie (siehe Abbildung 9). Das Cosmos Netzwerk weist viele Vorteile auf, vor allem im Bereich der Interoperabilität, allerdings ist das Protokoll verhältnismäßig neu und verfügt noch nicht über die de facto Standards, um NFTs zu implementieren. Aus diesen Gründen ist der "Champion" dieser Machbarkeitsstudie das Private Ethereum Netzwerk. Aufgrund des attraktiven Funktionalitätenspektrums des Cosmos-Netzwerkes ist das Protokoll jedoch nicht vollständig auszuschließen, sondern wird in dieser Studie als "Challenger" präsentiert und wird vor allem interessant, falls das Unionsregister mit anderen Emissionshandelssystemen verbunden werden soll (de facto besteht bereits das Linking mit dem Emissionshandelssystem der Schweiz, allerdings noch auf niedriger technischer Basis).

Abbildung 9: Bewertung DLT-Protokolle erweitert

DLT-Protokoll Bewertungs- kriterium	Public Ethereum	Private Ethereum	Cosmos	Hyperledger Fabric
Nutzbarkeit	9/10	9/10	6/10	5/10
Skalierbarkeit, Performanz	2/10	10/10	9/10	5/10
Interoperabilität	6/10	5/10	10/10	4/10
Sicherheit	10/10	9/10	9/10	7/10
Nachhaltigkeit	1/10	9/10	9/10	7/10
Kosteneffizienz	1/10	9/10	9/10	7/10

Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt School Blockchain Center, Capgemini Invent, Datarella

4 Lösungsarchitektur

4.1 Vorgehen für das Ableiten der Lösungsarchitektur

Wie im letzten Kapitel bereits abgeleitet wurde, kommt für das Emissionshandelsregister eine private permissioned Blockchain auf Basis des Ethereum Protokolls vorrangig infrage, da diese Trägertechnologie die identifizierten Anforderungen am besten erfüllt. Unter Beachtung der identifizierten Anforderungen sowie in Anlehnung an die zahlreichen Gespräche mit den Experten aufseiten des Auftraggebers wird im Folgenden ein fachliches Architekturkonzept für den Einsatz einer DLT im Emissionshandel beschrieben und evaluiert.

Dieses Architekturkonzept beschreibt einzelne Komponenten, über welche sich ein DLT-basierter Emissionshandel abbilden lässt. Hierbei wird zuerst auf Kernkomponenten und Prozesse eingegangen, bevor zum Abschluss mit der Integration von dezentralen Börsen und Self-Sovereign Identity der bisherige Fokus stark erweitert werden kann.

Bevor im Detail auf technische Aspekte eingegangen wird, werden die Anforderungen an ein Blockchain-basiertes Unionsregister abgeleitet. Dafür werden bestehende Kernprozesse im bestehenden System identifiziert und der Umsetzung in einer Blockchain gegenübergestellt.

Im nächsten Schritt wird auf Infrastrukturkomponenten eingegangen, welche benötigt werden, um das heutige, zentralisierte Unionsregister auf eine DLT-basierte Architektur zu übertragen. Zu diesen gehört das Aufsetzen einer Blockchain (Blockchain Setup), die Erstellung von DLT-kompatiblen Kontotypen, die Verlinkung von Blockchain Identitäten mit Benutzeraccounts sowie die Tokenisierung von Emissionsberechtigungen. Nach der Beschreibung der Infrastrukturkomponenten wird der Prozess des EUA Lifecycles dargestellt.

Zuletzt wird noch ein kompakter Ausblick auf Blockchain-basierte Lösungen gegeben, welche das Unionsregister funktionell stark erweitern und automatisieren könnte. Dies umfasst die Integration in andere Emissionshandelsregister wie das Kyoto-Protokoll sowie die Integration von Blockchain-basiertem Handeln und Auktionieren als auch die Integration von Self-Sovereign Identities.

Ein Vergleich der aktuellen Architektur und einer DLT-basierten Lösungsarchitektur fasst die markanten Unterschiede zusammen.

Das Ziel ist, mithilfe des Architekturkonzepts die Basis für die technische Implementierung eines DLT-basierten Systems zu legen. Anschließend wird ein Zwischenfazit gegeben, in welchem sich auf eine Umsetzungsform festgelegt wird, welche in dieser Machbarkeitsstudie weiterhin untersucht wird.

4.2 Systemanforderungen

Dieses Kapitel dient zur Ableitung der technischen Anforderungen eines Emissionshandelsregisters an die zugrundeliegende Blockchain Technologie und bildet damit die Grundlage für die Evaluierung einer Eignung für einen Einsatz der Blockchain für diesen Anwendungsfall (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2020a) (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2021b).

Rechtliche und regulatorische Aspekte bilden juristische Erfordernisse ab, die an das System gestellt werden. Zukunftsweisende Aspekte sind heute noch nicht im vollen Umfang erforderlich, können aber in Zukunft an Relevanz gewinnen und sollten bereits frühzeitig bei der Anforderungsanalyse berücksichtigt werden (Finck, 2019). Das Ergebnis dieses Vorgehens ist jedoch ein technischer Architekturentwurf auf Blockchain-Basis.

Die folgende Tabelle fasst die identifizierten Anforderungen an das DLT-basierte System zusammen. Der Fokus liegt dabei vorrangig auf dem Transfer und der Verwaltung von Emissionsberechtigungen auf Basis von geprüften und freigeschalteten Konten und deren bevollmächtigten Personen.

Tabelle 5: Anforderungsdefinition eines Blockchain-basierten Emissionshandelssystems

Anforderung	Beschreibung
Accountmanagement	Sichere Erstellung, Nutzung und Verwaltung von Benutzeraccounts
Kontenmanagement	Erstellen und Verwalten jeglicher Arten von Konten
Berechtigungsmanagement	Hinzufügen und Entfernen von kontobevollmächtigten Personen zu einem oder mehreren Konten
Identifizierung von Emissionsberechtigungen	Jede Emissionsberechtigung soll einer Handelsperiode und einer Seriennummer zuordenbar sein
Zuteilung von Emissionsberechtigungen	Transparente Zuteilung einer bestimmten Anzahl von Emissionsberechtigungen an Betreiberkonten
Handel von Emissionsberechtigungen	Teilnehmer dürfen untereinander Emissionsberechtigungen handeln (direkt miteinander oder über eine Börse)
Auktionierung von Emissionsberechtigungen	Zuteilen der Emissionsberechtigungen an Auktionierungskonten und Verteilung an Auktionsgewinner (sofern Bedingungen erfüllt)
Abgabe von Emissionsberechtigungen	Abgabe der Emissionsberechtigungen gemäß den ermittelten emittierten Emissionen der Anlage
Prüfung der Historie und der Abgabe von Emissionsberechtigungen	Nachvollziehbarkeit der Emissionsberechtigung von der initialen Zuteilung, Auktionierung, Handel bis hin zur Abgabe
Systembetrieb gewährleisten	Das System soll verfügbar bleiben und den aktuellen und wahren Stand des Unionsregisters wiedergeben
Interoperabilität	Kommunikation mit anderen Emissionshandelssystemen ermöglichen
Governance	Erstellung und Umsetzung eines technischen Regelwerks
Reporting	Bestimmte Daten müssen öffentlich verfügbar gemacht werden

4.3 Komponentenbeschreibung einer DLT-basierten Architektur

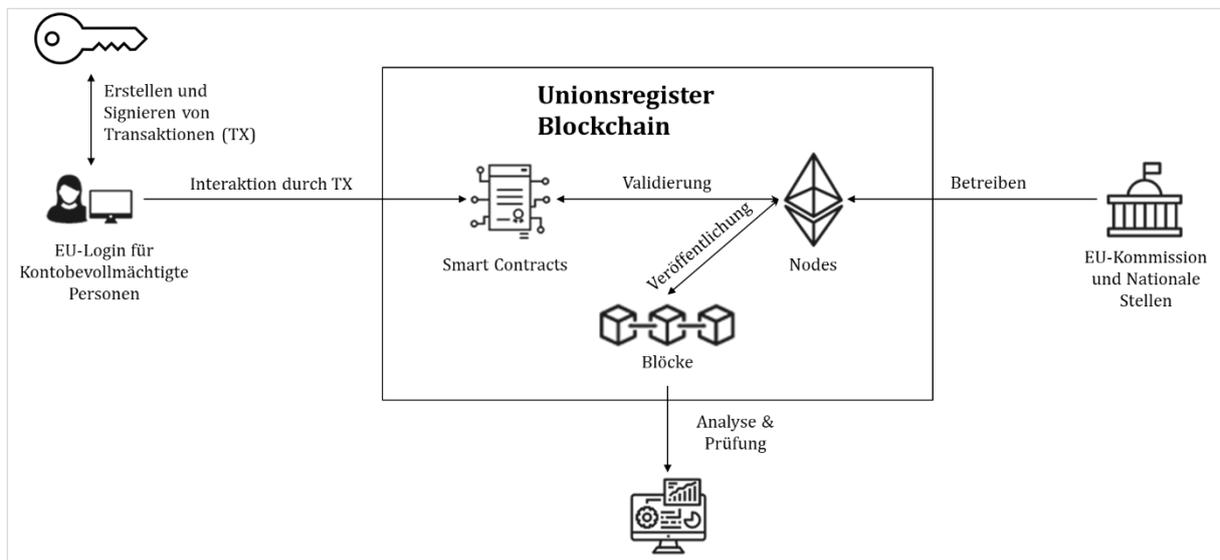
Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Beschreibung der Komponenten einer DLT-basierten Systemarchitektur. Zunächst wird die DLT als Infrastruktur für den EU-ETS Bereich im Unionsregister beschrieben. Hierbei wird zunächst das Blockchain Setup, also das Aufsetzen der Blockchain- und Node-Infrastruktur aufgeführt. Anschließend wird die Abbildung der bestehenden Kontotypen sowie Emissionsberechtigungen als Smart Contracts beschrieben. Schließlich wird die Verbindung von Nutzeridentitäten der Kontobevollmächtigten über Blockchain Nutzerkonten, sogenannte "Externally Owned Accounts" (EOAs) dargestellt.

Das Abbilden des Unionsregisters auf einem DLT-basierten System kann auf verschiedenen Wegen erreicht werden (Liss, 2018) (Pan, et al., 2019) (Richardson, et al., 2020) (Schletz, et al., 2020) (Kim, et al., 2020) (Fu, et al., 2018) (Energy Web Foundation, 2022). Dies hängt unter anderem auch vom bestehenden Reifegrad bestimmter Technologien und der Unterstützung von

offiziellen Stellen ab. Aus diesen Gründen kann zu Beginn ein Mittelweg gegangen werden, der die grundsätzlichen Vorteile einer Blockchain, wie beispielsweise eine erhöhte Transparenz und Nachvollziehbarkeit mit sich bringt, ohne bestehende Prozesse und Systeme wesentlich zu verändern. Dieser Mittelweg erlaubt auch in Zukunft weitere Technologien, wie Self-Sovereign Identities, einfach hinzuzufügen. Dieser Mittelweg umfasst im Wesentlichen die Transformation zu Blockchain-kompatiblen Benutzeraccounts sowie das Abbilden von Kontotypen in Form von Smart Contracts. Bestehende Prozesse sowie Rollen- und Berechtigungsmodelle können beibehalten und ggf. effizienter gestaltet werden.

Im Blockchain-basierten Unionsregister agieren mehrere Akteure, die unterschiedliche Interessen und Aufgaben besitzen. Dieses Ökosystem ist in der folgenden Abbildung 10 in Bezug auf die Rollenverteilung des Blockchain-Systems aufgezeigt.

Abbildung 10: Schematische Systemarchitektur eines Blockchain-basierten EHS

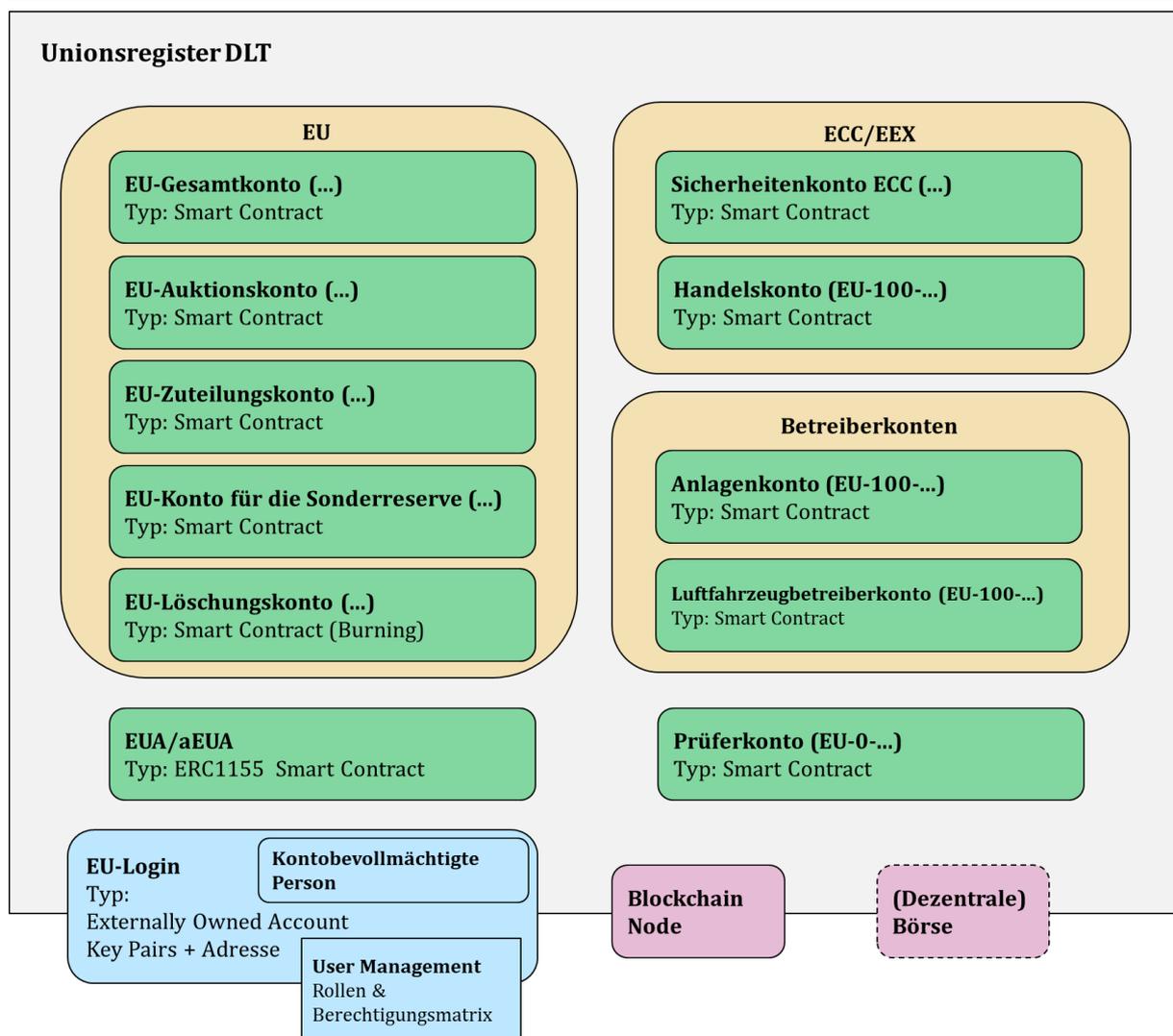


Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt School Blockchain Center, Capgemini Invent, Datarella

Zunächst gibt es die EU-Kommission, die die Blockchain Nodes primär betreibt und nationale Stellen aus Mitgliedsländern zum Betreiben von Nodes berechtigen lassen können. Wichtig hierbei ist, dass Betreiber der Nodes vertrauenswürdig sind. Sämtliche Kontotypen und weitere Funktionsbausteine, wie die tokenisierten Emissionsberechtigungen, sind über Smart Contracts implementiert. Mit diesen Smart Contracts können jegliche Arten von Anwendern (Kontotypen und kontobevollmächtigte Personen) interagieren, die eine zugehörige Berechtigung dazu besitzen. Die von den Anwendern initiierten, signierten und erfolgreich validierten Transaktionen werden von den Nodes zusammengefasst und in Blöcke geschrieben. Auf Basis dieser Blöcke ist der aktuelle Stand der Verteilung von Emissionsberechtigungen ablesbar und ermöglicht somit weiterführende Analysen und Reporting.

Smart Contracts spielen eine zentrale Rolle im Blockchain-basierten Unionsregister. Diese bilden sämtliche Kontotypen ab und haben eigene Funktionen, die von anderen Teilnehmern aufgerufen werden können. Eine grobe Übersicht über die verschiedenen Kontotypen ist in der folgenden Abbildung 11 aufgezeigt.

Abbildung 11: Smart Contract Aufteilung in einem Blockchain-basierten EHS



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt School Blockchain Center, Capgemini Invent, Datarella

Diese Abbildung zeigt zuerst die verschiedenen Kontotypen aufgeteilt auf die involvierten Akteure. Innerhalb der EU bestehen die folgenden Kontotypen: EU-Gesamtkonto, EU-Auktionskonto, EU-Zuteilungskonto, EU-Konto für die Sonderreserve, sowie das EU-Löschungskonto. Dem Auktionator und den Händlern hingegen sind das Sicherheitenkonto sowie ein Handelskonto zugewiesen. Betreiber von Anlagen oder Luftfahrzeugen besitzen darüber hinaus ein Anlagenkonto, bzw. ein Luftfahrzeugbetreiberkonto. Das Prüferkonto ist keinen der vorherigen Akteure zugeordnet und steht somit unabhängig und alleine, genauso wie die tokenisierten EUAs/aEUAs. Diese werden zwar von dem EU-Gesamtkonto erstellt, leben aber auf der Blockchain und verteilen sich nach der initialen Ausschüttung auf die jeweiligen Akteure.

Damit heutige Benutzeraccounts mit den Smart Contracts der Kontotypen interagieren können, werden EU-Logins verwendet, die beispielsweise kontobevollmächtigte Personen angehören. Diese EU-Logins, aus denen sich die Benutzeraccounts des Unionsregisters ableiten, können im Backend mit einem Schlüsselpaar (Keypair) ausgestattet werden, welches ihnen erlaubt, Transaktionen zu erstellen und zu signieren, um mit den Smart Contracts der Kontotypen zu interagieren. Um bestehende Prozesse nicht verändern zu müssen, kann die bestehende Rollen- und Berechtigungsmatrix wiederverwendet werden.

Zum Abschluss sind noch Blockchain Nodes aufgezeigt, die den reibungslosen Betrieb der Blockchain des Unionsregisters gewährleisten. Berechtigte Stellen können selbst einen solchen Node betreiben und damit zur Sicherheit des Systems beitragen. Hier wird nochmal betont, dass durch einen weiteren Node der Energiebedarf zwar steigt, dies aber durch einen effizienten und energiesparenden Konsensmechanismus zu durchschnittlichem Energiebedarf eines Servers führt (Bundesministerium für Umwelt, 2021). Zusätzlich bestünde für die Zukunft auch die Möglichkeit, die Auktionen und den Handel über eine dezentrale Börse (engl. Exchange) direkt und automatisch auf der Blockchain stattfinden zu lassen.

Die Interaktion mit den Smart Contracts findet dezentral statt. Das bedeutet, dass der Anwender auf seinem Client-Gerät eine Transaktion erstellt, beispielsweise durch das Klicken eines Buttons im Frontend, und diese Transaktion dort signiert und an die Nodes weiterleitet. Idealerweise findet dies über eine "Wallet" wie "MetaMask" (MetaMask, 2022) statt, welche die Schlüsselpaare enthält und nicht von dem System an sich verwaltet wird. Aus Gründen der Einfachheit und der intuitiven Nutzung kann diese Komponente zu Beginn auch im Backend betrieben werden, sodass der Anwender davon nichts mitbekommt.

4.3.1 Blockchain Setup

Um ein Blockchain-basiertes System zu initialisieren, muss im ersten Schritt die private und permissioned Blockchain aufgesetzt werden. Im Wesentlichen geschieht dies durch das Betreiben von Nodes, das Aufsetzen der jeweiligen Smart Contracts und das Verbinden von Client-Software zum Erstellen, Signieren und Verteilen von Transaktionen. Hier kann die EU-Kommission, welche bisher das Unionsregister betreibt und verwaltet, als Hauptakteur die Blockchain betreiben. Durch den dezentralen Charakter eines Blockchain-basierten Ökosystems besteht zudem die Möglichkeit, dass Mitgliedsstaaten eigene Blockchain-Nodes betreiben, um die Manipulations- und Ausfallsicherheit des Systems zu erhöhen, indem die Transaktionshistorien auf mehreren Servern dezentral und redundant gespeichert werden. Dafür müsste die EU-Kommission jedoch offen sein, die Verantwortung zum Betreiben der Blockchain mit anderen zu teilen. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass durch die daraus resultierende Redundanz eine höhere Ausfall- und Manipulationssicherheit sowie eine bessere Verfügbarkeit. Jedoch benötigt ein dezentrales Betreiben der Blockchain auch ein Governance Modell für die Auflösung von Diskrepanzen.

Da die Blockchain nun von ausschließlich vertrauenswürdigen Parteien betrieben wird und aktive Manipulationsversuche deutlich weniger wahrscheinlich sind, kann auf effizientere Konsensmechanismen zurückgegriffen werden. Hier kann der Konsensmechanismus "Proof-of-Authority" angewendet werden. Dieser sieht registrierte Teilnehmer mit ihren Accounts als vertrauenswürdig an, da sie vorab bereits von Prüfern freigeschaltet wurden und benötigt für die Validierung des Blocks keinen aufwendigen Rechenprozess. Der sich daraus ergebende Energieverbrauch ist daher nahezu zu vernachlässigen. Weitere Nodes verbrauchen nicht mehr Energie als Server mit herkömmlichen Aufgaben. Zwar ist es möglich, dass die höhere Anzahl der Server zu einem höheren Energieverbrauch führt, allerdings sind auch Alternativlösungen möglich, die den Energieverbrauch geringhalten, wie z. B. der Einsatz von Raspberry Pis als Nodes. Durch Nutzung von Proof-of-Authority erhöht sich neben der Energieeffizienz auch die Performanz beim Durchlauf der Transaktionen. (Kobiela, et al., 2021; Zimmermann & Hoppe, 2018)

Da es sich um ein privates Netzwerk handelt und Node-Betreiber vorher erst autorisiert werden müssen, können Schutzmechanismen und benötigte Ressourcen für die Validierung und Signierung von Transaktionen zu weiten Teilen zurückgefahren werden. So können die Transaktionsgebühren auf "Null" gesetzt werden, da Distributed Denial of Service (DDoS)- und

Sybil Attacken in der Transaktionserstellung und Kontenmanagement nur ein geringes Risiko darstellen. Somit werden für jegliche Transaktionen keine weiteren Vermögenswerte (sogenannte Gas-Fees) benötigt.

4.3.2 Kontentypen

Unter diesem Punkt sollen die Kontotypen des DLT-basierten Unionsregisters beschrieben werden. Hierbei soll zwischen zwei Kontenarten unterschieden werden. Konten, welche EUAs halten sowie Nutzerkonten, also Accounts von kontobevollmächtigten Personen, welche EUA Transaktionen von Konten initiieren und bestätigen können.

In Ethereum-basierten Systemen gibt es zwei Kontoarten. Externally Owned Account (EOAs) und Smart Contracts. Beide Kontentypen verfügen über eindeutige Adressen. Der wesentliche Unterschied dieser Konten ist, dass EOAs durch einen Private Key kontrolliert werden, durch welche Transaktionen initiiert und signiert werden können. Smart Contracts hingegen haben keinen privaten Schlüssel, allerdings verfügen sie über einen internen Speicher. In diesem Speicher können gängige Daten sowie Funktionen gespeichert werden. Somit kann in einem Smart Contract zum Beispiel eine bestimmte Anzahl EUAs zu einer Adresse festgehalten werden. Außerdem kann eine Rollenverteilung bestimmt werden, welche Adressen bestimmte Rechte gibt.

Die Möglichkeit eine Rollenverteilung sowie bestimmte Werte, wie einen Abgabewert, in Smart Contracts speichern zu können, erlaubt es, Betreiberkonten, Handelskonten, EU-Gesamtkonten, und weitere Kontenarten, die EUAs halten, als Smart Contracts abzubilden. In diesen werden die Adressen der kontobevollmächtigten Personen dokumentiert, welche Transaktionen von EUAs, welche der jeweiligen Konten Smart Contract Adresse zugeordnet sind, initiieren und bestätigen dürfen.

Kontobevollmächtigte Accounts werden als EOAs auf der Blockchain abgebildet und haben bestimmte Rollen und Berechtigungen, um mit Smart Contracts zu interagieren. Die zugehörigen Schlüsselpaare können zwar zu Beginn von der Anwendung im Backend anstatt von den Anwendern gehalten und verwaltet werden. Das langfristige Ziel sollte jedoch sein, diese dem Anwender selbst zu überlassen. Hierfür müsste eine Backup- und Recovery Option geschaffen werden, denn es ist nicht auszuschließen, dass User ihre Zugangsdaten verlieren. Zudem müssten die User sensibilisiert werden, niemals ihren Private Key mit anderen zu teilen.

Eine Erweiterung des heutigen Emissionshandels (ob über eine Börse oder direkt zwischen den kontobevollmächtigten Akteuren) kann auch die Involvierung von Privatpersonen sein. Diese würden ohne Smart Contract als EOA verbunden mit dem EU-Login im Emissionshandelssystem agieren und könnten wie Betreiberkonten auch eigene Emissionsberechtigungen halten.

4.3.3 Verlinkung Blockchain Identität mit Benutzeraccounts

Da nun die grundlegende Blockchain Infrastruktur beschrieben wurde, ist zu bestimmen, wie Anwender damit interagieren können. Dies geschieht anstatt über Benutzername und Passwörter durch sogenannte Schlüsselpaare bestehend aus einem Public Key (analog zum Benutzername) und einem Private Key (analog zum Passwort). Sie ermöglichen eine native und direkte Interaktion mit der Blockchain. Diese Schlüsselpaare werden in der Regel nicht von der Blockchain oder einem zentralen System, sondern vom Benutzer gehalten (non-custodial). So wird garantiert, dass niemand außer dem Benutzer selbst eine Transaktion signieren und autorisieren kann. Zur intuitiveren Bedienung des Systems kann das Schlüsselpaar Teil des EU-Logins oder dem daraus resultierenden Profil im Emissionshandelsregister verknüpft werden (custodial). Zur reibungslosen Interaktion mit dem Unionsregister kann der EU-Login und das

jeweilige Benutzerkonto im Unionsregister gekoppelt und mit dem Public und Private Schlüsselpaar hinterlegt werden, die mit der unterliegenden Blockchain kompatibel sind. Diese Art von Identität nennt sich "Externally Owned Account" (EOA) und beschreibt, dass die Adresse oder der Account von einem Private Key verwaltet wird. Die Schlüsselpaare werden dem Anwender im ersten Schritt nicht zugänglich gemacht und von der aktuellen Systeminfrastruktur verwaltet. Mithilfe dieser Schlüsselpaare ist es möglich, mit den Kontentypen zu interagieren, die als Smart Contracts abgebildet werden, und ausgewählte Vorgänge auf der Blockchain zu dokumentieren. Dazu zählt beispielsweise die Bestätigung des Abgabewerts durch die Prüferkonten.

Wie bereits erwähnt, können die bestehenden Betreiberkontentypen als Smart Contracts abgebildet werden und zugehörige Benutzeraccounts von kontobevollmächtigten Personen für die Interaktion mit diesen hinterlegt werden. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass der Ersteller (sprich der Inhaber) eines Betreiberkontos bestimmen kann, welche anderen Personen die Berechtigung zur Interaktion mit dem Smart Contract (dem Konto im Unionsregister) besitzen sollen. Möglich ist hier auch, eine Adresse der nationalen Stellen zu hinterlegen, um im Notfall die Verwaltung dieser Betreiberkonten zu übernehmen. Dies sollte aber nur als letztes Mittel dienen, um nicht die Integrität des Betreiberkontos zu gefährden.

Das bestehende Rollen- und Berechtigungssystem kann in der jetzigen Form fortgeführt werden, da die aktuell verwendeten Anwendungen diese schon unterstützen. Hierbei ist es jedoch wichtig, die jeweiligen Schritte zum Hinzufügen oder Entfernen von Usern zum Smart Contract sowie die Interaktion mit selbigem ausführlich und intuitiv zu gestalten und zu dokumentieren. Das Hinzufügen eines neuen Users kann durch eine Funktion im Smart Contract durchgeführt werden. Eine bestehende kontobevollmächtigte Person kann die Adresse oder die URID des anderen angeben. Hier bestünde die Möglichkeit, das Einverständnis anderer kontobevollmächtigter Personen dieses Kontos durch Multisignatur Smart Contracts umzusetzen. Damit wird ein neuer Akteur erst hinzugefügt, wenn alle oder ein bestimmtes Quorum dem zustimmen. So kann der Ersteller eines Betreiberkontos beispielsweise festlegen, welche anderen EOAs (in Form von Adressen) auf den Smart Contract zugreifen dürfen und welche Berechtigungen diese haben. Dies kann zu Beginn vom Systembetreiber durchgeführt werden.

4.3.4 Emissionsberechtigungen

Nachdem die grundlegende Blockchain Infrastruktur und das Kontenmanagement abgeschlossen ist, kann mit der weiteren Integration der Infrastruktur sowie vor- und nachgelagerten Prozesse auf die Blockchain fortgefahren werden.

Dafür können die Emissionsberechtigungen in Form von sogenannten Non-Fungible Tokens (NFTs) abgebildet werden. Diese eignen sich ideal, da sie eine Seriennummer und Jahreskennnummer nativ abbilden können. So können die Emissionszertifikate untereinander und zwischen den Handelsperioden unterschieden werden. Der bekannte ERC20-Standard, der häufig reguläre Kryptowährungen auf der Ethereum-Blockchain abbildet, kann nicht zwischen Token des gleichen Smart Contracts unterscheiden und ist daher ungeeignet, weil die Seriennummern nicht auf individuellen Token abgebildet werden können.

Im Detail werden hier sogenannte ERC1155 Token verwendet, welche einer der beiden bekanntesten NFT Standards neben ERC721 abbildet. Die ERC1155 Token haben den Vorteil, dass sie zur gleichen Gruppe von Token gehören, aber sich durch Attribute oder Metadaten unterscheiden können, beispielsweise durch die Seriennummer analog zu bestehenden Emissionsberechtigungen. ERC1155 Token sind daher fungibel auf Wertebene, aber nicht

fungibel auf Seriennummerebene. Darüber hinaus können diese Token gesammelt mit einer einzigen Transaktion erstellt werden und erfordern keine individuelle Transaktion für jeden Token wie bei ERC721. Ebenso ist es möglich, innerhalb von einer Transaktion beliebig viele Token zu transferieren. Eine Gegenüberstellung dieser drei Token Standards ist in der folgenden Tabelle aufgelistet. Es ist klar zu sehen, dass ERC1155 die Vorteile der beiden anderen Standards vereint und sich somit als bestes für die Nutzung im Unionsregister eignet.

Tabelle 6: Eigenschaften der gängigen Token Standards auf Ethereum im Vergleich

Token Standard	Abbildung von Seriennummern	Sammel-Erstellung	Sammel-Transaktionen
ERC20	Nein	Ja	Ja
ERC721	Ja	Nein	Nein
ERC1155	Ja	Ja	Ja

Zur konkreten Umsetzung der Emissionsberechtigungen muss nun die EU-Kommission einen ERC1155 Smart Contract aus einem Template generieren, der die definierte Menge an Emissionsberechtigungen in Form von Token erstellt. Dies kann ganz einfach über Smart Contract Vorlagen erstellt werden, in welchem nur die Anzahl an Token eingegeben werden und das Erstellen des Smart Contract autorisiert werden muss.

Zu Beginn einer Handelsperiode werden nun so viele dieser Token erzeugt wie es Emissionsberechtigungen geben soll und sind zu Beginn nur dem EU-Gesamtkonto zugewiesen. Von hier aus werden diese an das EU-Auktionskonto, EU-Zuteilungskonto und das EU-Konto für die Sonderreserve gesendet. Gemäß der initialen Zuteilung werden die Emissionsberechtigungen vom EU-Zuteilungskonto an die Smart Contracts der Anlagen- und Luftfahrzeugbetreiberkonten gesendet. Wird ein CEMS (Continuous emissions monitoring system, dt. KEMS) für die Prüfung von Zuteilung und Abgabe benutzt, können zudem Emissionswerte durchgehend ermittelt und die Daten automatisch an die Blockchain übermittelt werden. Grundsätzlich kann auch ein CEMS mit einem KeyPair ausgestattet werden, oder modernere Schnittstellenlösungen (IDS) könnten erweitert werden, wenn die Infrastruktur eine hinreichende Kopplung von CEMS und Blockchain ermöglicht. Steht eine Auktion von Emissionsberechtigungen an, kann wie heute die bestimmte Menge an das Sicherheitenkonto der ECC übertragen werden, von wo es aus an das ECC Handelskonto übertragen wird. Nach erfolgreicher Auktion können die Token voll automatisiert an die Anlagen- oder Luftfahrzeugbetreiberkonten übermittelt werden.

Nun hat jeder Akteur die Möglichkeit, die zugeteilten Emissionsberechtigungen zu handeln. Dafür müsste die EEX die Blockchain-basierten EU-Logins unterstützen. Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit, dass die Akteure ihre Emissionsberechtigungen unabhängig von der EEX bzw. einer zwischengelagerten Börse direkt miteinander handeln. Da zwei Betreiber bzw. ein Betreiber und Händler über ihren Blockchain-basierten EU-Login über das KeyPair verfügen, mit dem direkte Transaktionen durchgeführt werden können, steht dem direkten Austausch von Emissionsberechtigungen zwischen den beiden nichts im Weg. In Zukunft wäre es auch möglich, die Börse komplett zu dezentralisieren, sofern ein Gateway zu Echtgeld (Fiatgeld) – idealerweise einem digitalen Euro – vorhanden ist. Dezentrale Börsen werden über Smart Contracts abgewickelt, entweder über klassische Orderbücher oder automatisierte Market Maker (siehe unten) und erfreuen sich steigender Beliebtheit. (Air Carbon, 2022)

4.3.5 Anwendungen und Prozesse

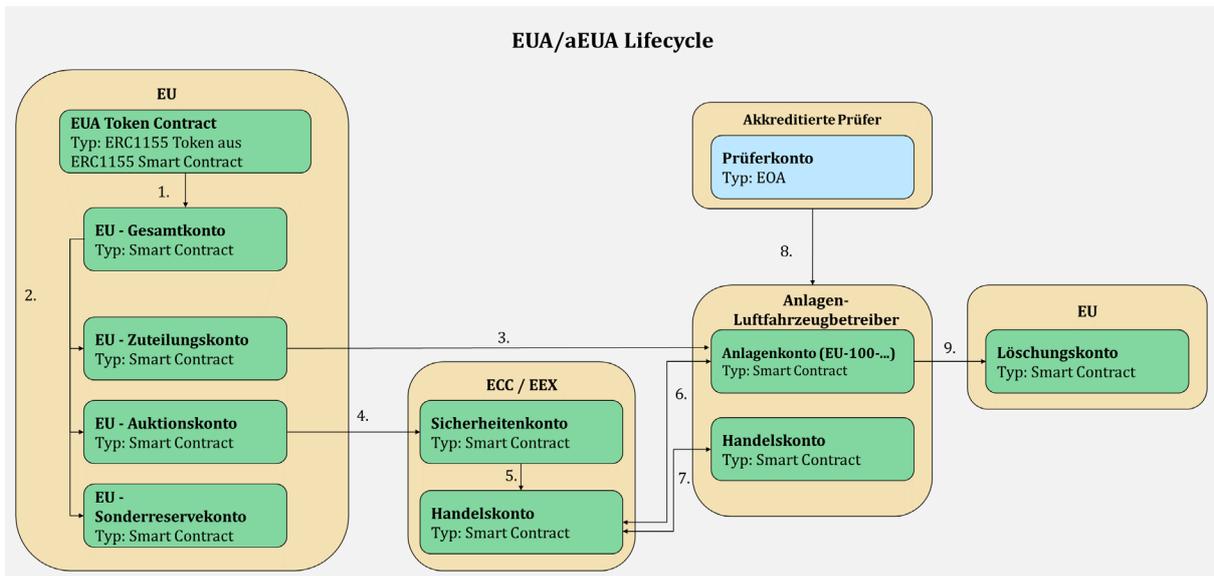
Durch die Verwendung von Smart Contracts und EOAs kann bei der initialen Zuteilung, an Auktionen, oder beim Handeln von Emissionsberechtigungen im Hintergrund Transaktionen automatisch erstellt, signiert und an die Blockchain verteilt werden. Es besteht kein Bedarf zur Änderung von bestehenden Prozessen oder User Interfaces, sondern lediglich im Backend, wenn die jeweilige Aktion autorisiert wurde. Die folgenden Transaktionen können mit der bestehenden Architektur in der Blockchain abgebildet werden, nachdem der Benutzeraccount erfolgreich beantragt und mit Public/Private Schlüsselpaaren ausgestattet ist:

Tabelle 7: Prozesse des Emissionshandels auf Blockchain-Basis

Transaktion	Beschreibung
Registrierung des Benutzerkontos mit EU-Login	Damit eine kontobevollmächtigte Person oder ein bestimmtes Konto (z. B. ein Anlagenkonto) in der Zuteilung, der Auktion oder im Handel tätig werden kann, muss der Public Key bzw. die zugehörige Adresse aus dem EU-Login registriert werden. Diese Legitimation des Benutzerkontos kann durch eine Signatur der DEHSt-verantwortlichen Person als Mehrfachsignatur mit weiteren Akteuren durch die EU-Kommission, des Kontoinhabers oder eines Prüfers bei der Erstellung des Accounts durchgeführt und legitimiert werden.
Erstellung der Emissionsberechtigungen	Aus einem Smart Contract Template wird eine vorher definierte Anzahl an ERC1155 Tokens erstellt.
Kostenlose Ausgabe von Emissionsberechtigungen	Die DEHSt-verantwortliche Person autorisiert die festgelegte Ausgabemenge von Emissionsberechtigungen an die Anlage- und Luftfahrzeugbetreiberkonten. Diesen Konten wird die jeweilige Ausgabemenge in Form von ERC1155 Token an die jeweilige Adresse des Smart Contracts zugesendet. Wird die Ausgabemenge über Emissionsdaten ermittelt, die über ein CEMS übermittelt und auf der Blockchain erfasst wurden, kann die Ausgabe über den Smart Contract automatisiert werden.
Abgabe der Anzahl an Emissionsberechtigungen	Nachdem der Emissionsbericht erfolgreich geprüft wurde, führt die kontoverantwortliche Person mittels einer Smart Contract Interaktion die Abgabe der Emissionsberechtigungen für eine Handelsperiode durch. Werden die Emissionsdaten für die Prüfung über ein CEMS zur übermittelt und auf der Blockchain erfasst, kann die Abgabe durch den Smart Contract auch automatisch erfolgen.
Abgabe eines Angebots in einer Auktion	Die Abgabe eines Angebots wird in der Blockchain dokumentiert.
Ausschüttung von Emissionsberechtigungen laut Auktionsergebnis	Laut Auktionsergebnis werden Emissionsberechtigungen an erfolgreich bietende Anlage- und Luftfahrzeugbetreiberkonten mittels Sammeltransaktion ausgeschüttet.
Handel von Emissionsberechtigungen	Nach erfolgreichem Handel an der EEX wird der Transfer der Emissionsberechtigungen auf der Blockchain gespeichert. Dafür könnte die EEX eine dezentrale Exchange (DEX) betreiben oder die Schlüsselpaare auf deren Anwendung unterstützen. Die Emissionsberechtigungen könnten aber auch direkt zwischen den Akteuren gehandelt werden, die über ein eigenes Schlüsselpaar verfügen.

Die folgende Abbildung und Tabelle zeigen und beschreiben den Prozessfluss eines EUAs auf der Blockchain.

Abbildung 12: Der EUA/aEUA Lifecycle auf Blockchain-Basis



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt School Blockchain Center, Capgemini Invent, Datarella

Tabelle 8: Der EUA/aEUA Lifecycle auf Blockchain-Basis – Beschreibung

	Aktivität
Schritt 1	Beschluss über Menge und Verteilung von EUAs einer Handelsperiode. EUAs für Handelsperiode werden als NFTs (nach ERC1155 Standards erstellt). Hierbei hat jede EUA eine eindeutige Seriennummer. Die EUAs werden auf die Adresse des EU-Gesamtkontos ausgegeben (geminted).
Schritt 2	Verteilung an EU-Auktion, Zuteilung und Sonderreserve.
Schritt 3	Kostenlose Ausgabe an Betreiberkonten.
Schritt 4	Zwei Tage vor Auktion werden EUAs aufs Sicherheitenkonto überwiesen.
Schritt 5	Zur Auktion Überweisung an Handelskonto der ECC.
Schritt 6	Transfer von EUA auf Handelskonto der ECC (nach erfolgreicher Versteigerung).
Schritt 7	Transfer auf Handelskonto oder Betreiberkonto.
Schritt 8	Prüferkonto trägt abzugebende Menge ins Betreiberkonto ein.
Schritt 9	Übertragung (insb. Abgabe) EUAs auf Löschkonto am Ende eines Jahres.

4.3.6 Verbindung DLT EU-ETS mit Kyoto Register

In diesem Unterkapitel wird kurz die Machbarkeit des Verbindens eines auf DLT-basierendes EU-ETS mit dem Kyoto Register und –konten angeschnitten. Die Vertiefung dieses Themas erfolgt im Kapitel 4.5.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, DLT Systeme durch sogenannte Bridges zu verbinden. So könnte sowohl das EU-ETS als auch das Kyoto-Register über eine souveräne Blockchain mit Bridges verbunden werden. Dies ermöglicht einen Transfer von Emissionsberechtigungen. Als Betreiber könnte das Sekretariat des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) infrage kommen.

Würde das ETS System auf Basis der Cosmos SDK entwickelt, können in diesem Beispiel das EU-ETS und das Kyoto Register souveräne Blockchains sein, aber durch das Inter-Blockchain Communication Protokoll höchst kompatibel miteinander sein und sehr leicht die Token nativ handeln oder über Smart Contracts interagieren lassen.

4.3.7 Auktion und Handel von Berechtigungen mit DLT

Im Moment wird die Auktionierung sowie der Handel von Emissionsberechtigungen über die European Energy Exchange (EEX) abgewickelt, wenn die Akteure diese nicht direkt austauschen. Kosten, die hierfür entstehen, werden durch die Handels- und Cleraringebühren gedeckt, die von den Marktteilnehmern zu entrichten sind.

In diesem Unterkapitel soll die Machbarkeit der Auktionierung sowie des Handels von EUAs direkt auf der DLT beschrieben werden. Hierzu soll auf das Konzept von Bonding Curves eingegangen werden, welche die technische Grundlage zur Abbildung der Auktionierung und des Handels auf DLT bilden.

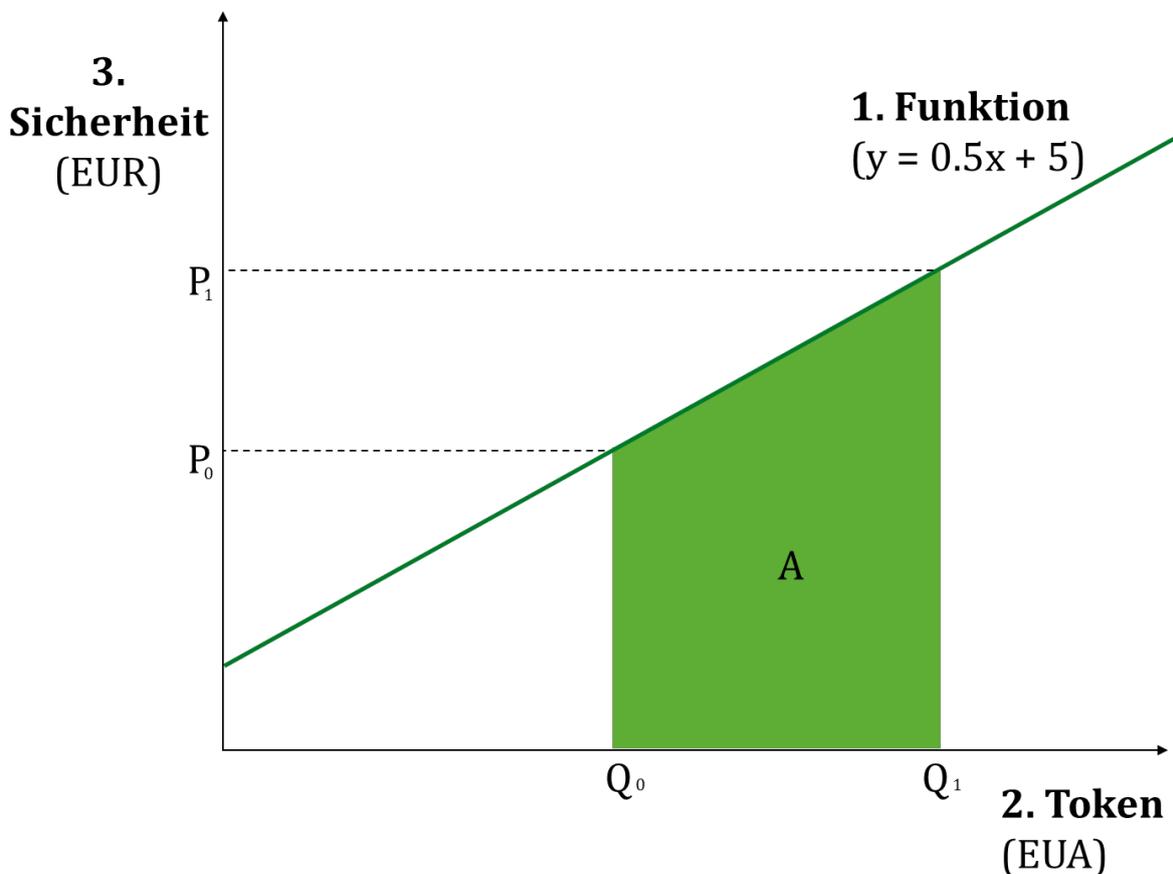
Als Bonding Curves werden Smart Contracts bezeichnet, welche eine mathematische Kurve beschreiben, die das Verhältnis zwischen Preis und Anzahl an Tokens darstellen. Einfache Bonding Curve Smart Contracts halten zwei Assets. Einen Token, der ausgegeben wird, beispielsweise EUAs sowie eine Sicherheit, beispielsweise EUR repräsentierende Tokens. Teilnehmer können dann die Tokens, aus dem Bonding Curve Contract kaufen sowie diese wieder an das Programm zurückverkaufen.

Anders als bei einem traditionellen Orderbuch Verfahren, wird bei dem Handel über einen Bonding Curve Smart Contract keine Gegenpartei gebraucht. Daher werden diese auch als Automated Market Makers (AMMs) bezeichnet. Die Voraussetzung hierfür ist allerdings ausreichend Liquidität beider Assets.

Die Parameter eines Bonding Curve Smart Contracts können beliebig programmiert werden. Hierbei sind drei wesentliche Elemente zu berücksichtigen:

1. Die Funktion, die das Supply/Preis Verhältnis bestimmt. Diese kann beispielsweise linear verlaufen, exponentiell ansteigen oder sich stufenweise erhöhen. Außerdem lassen sich Gebühren in die Kauf- oder Verkauf-Funktion einbauen. Diese Art von Bonding Curves werden auch als Augmented Bonding Curves (ABC) bezeichnet.
2. Der Token, der durch das Einzahlen von Sicherheiten (EUR) ausgezahlt wird. Dieser kann beispielsweise EUAs repräsentieren.
3. Die Sicherheit, welches in die Bonding Curve einbezahlt wird, um neue Tokens zu erstellen und/oder Tokens aus dem Bonding Curve Contract zu kaufen.

Abbildung 13: Beispiel einer Bonding Curve Funktion für dezentrale Börsen



Quelle: eigene Darstellung, Frankfurt School Blockchain Center, Cag Gemini Invent, Datarella

In der Abbildung 13 wird der Betrag A dargestellt, welcher bei einem Kauf von einer Anzahl von $(Q_1 - Q_0)$ EUAs durch einen Bonding Curve Smart Contract mit der Funktion $y = 0.5x + 5$ zu bezahlen wäre. Durch den Kauf erhöht sich der Preis pro EUA in EUR von P_0 auf P_1 .

Auktionierung durch Bonding Curve Smart Contracts

Wie bei der traditionellen Auktion wird ein Mindestpreis, zu welchem die EUAs verkauft werden sollen, in dem Smart Contract bestimmt. Anschließend wird die zu auktionierende Anzahl an EUAs an die Adresse des Smart Contracts geschickt. Bieter können nun in dem vorbestimmten Zeitraum ihre Angebote schicken. Hierfür geben die Anwender die Anzahl der EUAs sowie den Betrag in Euro an, welche in einer Transaktion gesammelt und an den Smart Contract gesendet wird. Wie im traditionellen Prozess ist es möglich, durch das Senden von weiteren Transaktionen das Gebot zu ändern oder zurückzunehmen. Nach Ablauf der Zeit wird der Clearing Price im Smart Contract berechnet. Ist der Auction Reserve Preis erreicht, werden die Token EUAs an die Adressen der Bieter gesendet. Sollte der Preis nicht erreicht werden, erhalten die Bieter ihr Angebot zurück.

Handel über Bonding Curve Smart Contracts

Durch den algorithmischen Austausch von Assets entlang der Preiskurve werden, wie bereits erwähnt, Bonding Curves auch als Automated Market Makers bezeichnet. Sobald Liquidität in das System eingebracht ist, können Marktteilnehmer ihre EUAs/aEUAs entlang der Preiskurve kaufen und verkaufen. Interessant hierbei ist, dass sich in den Smart Contract auch

Gebührenstrukturen einprogrammieren lassen. Somit kann, z. B. auf den Kauf und Verkauf, eine x% Gebühr abgezogen werden, welche zur Erhaltung und Weiterentwicklung des Systems oder andere Zwecke verwendet werden kann.

4.3.8 SSI im Emissionshandelssystem durch DLT

SSI (Self-Sovereign Identity) bezeichnet ein neuartiges digitales Identitätskonzept, welches dem Nutzer erlaubt, die volle Kontrolle über diese Identität zu besitzen und selbst zu bestimmen, welche Daten mit Dritten geteilt werden und für wie lange. Dies steht im Gegensatz zu heutigen digitalen Identitäten (Accounts), welche man auf den Servern des Online-Dienstes anlegt und weitestgehend keine Macht darüber besitzt.

Im Gegensatz zu konventionell erstellten Benutzeraccounts, bietet SSI die Möglichkeiten, seine Identität nicht gänzlich einem Anbieter offenzulegen und von ihm abhängig zu sein. Vor allem für sicherheitskritische Anwendungsfälle, in denen bisher auf KYC zurückgegriffen werden muss, bietet SSI eine sichere und komfortable Alternative. Hier können die User beispielsweise durch einen vorab abgeleiteten Personalausweis in Form eines standardisierten Verifiable Credentials die Identifizierung, Authentifizierung oder Autorisierung durchführen, ohne dass Daten permanent im Unionsregister gespeichert werden müssen. Die Abfrage der Verifiable Credentials kann somit anlassbezogen durchgeführt werden, beispielsweise im Falle eines Untersuchungsverfahrens. Ebenso kann dadurch das Only-Once-Principle für Nutzer implementiert werden.

Ansetzen könnte das SSI-Konzept in diesem Rahmen, wenn ein Nutzer über seinen EU-Login auf das Unionsregister zugreifen möchte. Ein Nutzer könnte hier seine SSI anstelle oder in Kombination mit dem EU-Login nutzen. In der Regel verfügt ein Nutzer über verschiedene Identitätsattribute. Je nach Benutzerkonto können das hier personenbezogene Daten, Berechtigungsstufen, Zugangsdaten, etc. sein. Diese Attribute könnten von einem hoheitlichen Aussteller (der EU) den einzelnen natürlichen oder juristischen Personen einmalig und beglaubigt ausgestellt werden, um dann als verifizierbare Berechtigungsnachweise („Verifiable Credentials“) mit dem SSI-Profil vorgelegt zu werden. Die so zustande kommende Identität wird mit einem Private Key signiert und damit verifiziert. Ein entsprechender Public Key dieser Person, auch die der Mitarbeiter und Administratoren des Unionsregisters, kann auf der unterliegenden Blockchain-Infrastruktur für andere hinterlegt und dafür genutzt werden, um die Identität bei Zugriffsanfragen zu überprüfen.

Im Hinblick auf eine Integration in das EU-ETS kann SSI in nächster Zeit auf großes Interesse stoßen. Durch die native Integration von digitalen Identitäten und Identitätsattributen besteht hier großes Digitalisierungs- und Automatisierungspotenzial. Identitäten müssten nicht mehr manuell geprüft werden, sondern werden automatisch anhand der Attribute interpretiert und bestimmte Prozesse gestartet und durchlaufen. Dadurch kann sich beispielsweise die Erstellung und Prüfung eines Accounts auf Sekunden reduzieren – bei gleichbleibendem oder ggf. höherem Vertrauensniveau.

SSI gewinnt zunehmende Beachtung. IDunion (IDunion, 2022), ein Konsortium, das aus Institutionen und Unternehmen besteht, widmet sich der Aufgabe, ein umfassendes SSI-Ökosystem für allerlei Anwendungsfälle aufzubauen. Ebenso betreibt die EU-Kommission die “European Blockchain Service Infrastructure” (EBSI) (EU-Kommission, EBSI, 2022) welches schon im Testlauf dezentrale Identitäten für Bürger abgeleitet hat. In Anbetracht der Vorteile könnte SSI in Zukunft ein bedeutender Standard werden, der auch im Blockchain-basierten Unionsregister zum Einsatz kommen kann. Aktuell wird noch an einer grundlegenden,

dezentralen Vertrauensinfrastruktur gearbeitet, auf welchem sich das Vertrauen in Daten und Identitäten ableitet.

Als mögliche Alternative zur Integration von legitimen digitalen Identitäten von natürlichen und juristischen Personen könnte das eIDAS Framework (EU-Kommission, eIDAS Regulation, 2021) dienen. Dies hat den großen Vorteil, dass diese Technologie schon seit Jahren erfolgreich im Einsatz und europaweit gültig ist und könnte dadurch schon mit geringerem Aufwand die manuellen Prozesse zur Prüfung von Identitäten unterstützen. Im Gegensatz zu SSI ist es allerdings nicht nativ möglich ein Verhältnis zwischen juristischer Person und natürlicher Person zu ziehen, beispielsweise Mitarbeiter A ist bei Firma B angestellt, was wiederum eine manuelle Prüfung erfordert. Das 2021 neu geplante eIDAS 2.0 soll jedoch einige Prinzipien von SSI übernehmen. Zum Zeitpunkt des Abschlusses dieser Machbarkeitsstudie gab es hierfür aber noch keine konkreten Informationen und sollte daher im Auge behalten werden. (EU-Kommission, 2021)

4.4 Systemvergleich

Die aus den Anforderungen und den DLT-Komponenten resultierende Ausformung einer DLT-basierten Architektur erlaubt nun eine Gegenüberstellung mit der aktuellen Umsetzung des Unionsregisters.

Tabelle 9: Vergleich der Anforderungen zwischen aktueller und Blockchain-basierter Umsetzung

Identifizierte Anforderung	Aktuelle Umsetzung	Umsetzung DLT
Benutzer-accountmanagement	Der Anwender beantragt über den EU-Login einen Benutzeraccount, über den er Zugang zu den ihm zugewiesenen Konten im Unionsregister freigeschaltet bekommt.	Der EU-Login und das daraus resultierende Profil im Unionsregister kann durch ein Blockchain-kompatibles Schlüsselpaar erweitert werden. Dies ermöglicht die Verbindung und Interaktion mit Smart Contracts.
Betreiber-kontomanagement	Durch die Nutzer-ID (URID) kann ein Benutzer im Unionsregister bestimmte Kontentypen (z. B. Anlagenkonto) beantragen bzw. mit ihnen interagieren. Die Konten werden vom Systembetreiber angelegt.	Bei der Initialisierung des Betreiberkonto Smart Contracts werden EOAs der kontobevollmächtigten Personen hinterlegt. Die Smart Contracts bieten Funktionen zum Kontomanagement wie das Hinzufügen oder Entfernen von kontobevollmächtigten Personen. Dies kann ohne den Eingriff des Systembetreibers geschehen.
Berechtigungs-management	Konten und Anwender unterliegen einer Rollen- und Berechtigungsmatrix, die zentral verwaltet wird.	Rollen und Rechte eines Betreiberkontos und Anwender werden durch Smart Contracts abgebildet. Das bestehende Rollen- und Rechtemanagement bleibt bestehen.
Identifizierung von Emissionsberechtigungen	Emissionsberechtigungen sind auf Datenbankbasis zentral verwaltet und durch Seriennummern und Jahreskennnummer identifiziert.	Die festgelegte Menge der Emissionsberechtigungen einer Handelsperiode wird als ERC1155 Token "NFT" durch einen Smart Contract erstellt. Die Seriennummer und Jahreskennnummer sind im Token hinterlegt.

Identifizierte Anforderung	Aktuelle Umsetzung	Umsetzung DLT
Zuteilung von Emissionsberechtigungen	Die Emissionsberechtigungen werden in der Datenbank den jeweiligen Betreiberkonten zugewiesen.	Nachdem die Token erstellt wurden, liegen sie im EU-Gesamtkonto. Von dort aus werden sie als Sammeltransaktion an die Smart Contracts der Betreiberkonten und den anderen EU-Konten gesendet.
Handel von Emissionsberechtigungen	Über interne Transaktionen werden Emissionsberechtigungen an das Sicherheiten- und Handelskonto der EEX/ECC überwiesen. Der Handel findet auf deren Systemen statt.	EEX und ECC müssten Blockchain-basierte EU-Logins für das heutige System unterstützen, um den Handel zu ermöglichen. Der Handel könnte aber auch komplett dezentralisiert werden, indem ein Smart Contract basiertes Orderbuch oder ein Automated Market Maker erstellt und verwendet wird. Der Transfer der gehandelten Emissionsberechtigungen fände komplett automatisiert statt. Es ist kein separates System notwendig, sondern lediglich eine neue Weboberfläche, die das ermöglicht.
Auktionierung von Emissionsberechtigungen	Die EEX koordiniert die Auktion. Die ECC verwalten die Zahlungsströme und Eigentumsverhältnisse. Teilweise manuelle Bearbeitung der Auktionsergebnisse und Transfer der Emissionsberechtigungen.	EEX und ECC müssten Blockchain-basierte EU-Logins für das heutige System unterstützen, um die Auktionen zu ermöglichen. Über Transaktionen können Gebote abgegeben werden. Die Auktion könnte aber auch komplett dezentralisiert werden, indem ein Smart Contract-basiertes Auktionssystem oder ein Automated Market Maker erstellt wird. Der Transfer der auktionierten Emissionsberechtigungen fände komplett automatisiert statt. Es ist kein separates System notwendig, sondern lediglich eine neue Weboberfläche, die das ermöglicht.
Abgabe von Emissionsberechtigungen	Nach der Prüfung autorisiert eine kontobevollmächtigte Person die Abgabe und den Transfer der Emissionsberechtigungen an das EU-Löschungskonto.	Das EU-Löschungskonto ist ein Smart Contract, über welches die NFTs "geburned" werden können. Eine kontobevollmächtigte Person ruft dafür eine Funktion des Smart Contracts auf.
Prüfung der Transaktionshistorie von Emissionsberechtigungen	Die Historie der Emissionsberechtigungen sind in der Datenbank einzusehen.	DLT dient zur vollständigen Dokumentation aller Vorgänge durch die Transferhistorie der Emissionsberechtigungen in Form von NFTs.
Systembetrieb gewährleisten	Die EU-Kommission betreibt das Unionsregister. Nationale Stellen unterstützen in der Verwaltung. EEX und ECC verantworten Handel und Auktionen.	Die EU-Kommission und nationale Stellen betreiben Nodes. Nationale Stellen unterstützen in der Verwaltung, aber höherer Automatisierungsgrad. Handel und Auktionierung kann nahezu vollständig dezentralisiert und automatisiert werden.
Interoperabilität	Das Unionsregister ist ein in sich geschlossenes System.	Blockchains arbeiten in einem de-facto Standard Framework und Kryptografie,

Identifizierte Anforderung	Aktuelle Umsetzung	Umsetzung DLT
		welche die Kommunikation mit anderen Blockchains erlaubt. So können leicht Schnittstellen zu anderen DLT-Systemen entwickelt werden und so neue Wege der Zusammenarbeit ermöglichen.
Governance	Die EU-Kommission und die nationalen Stellen verwalten und bestimmen das Regelwerk und die Prozesse.	Die EU-Kommission und die nationalen Stellen verwalten und bestimmen das Regelwerk und die Prozesse. Es besteht die Möglichkeit, andere Stakeholder zu integrieren.
Reporting	Das Unionsregister bietet öffentlich zugängliche Informationen zu verschiedenen Themen wie Ausgaben von Berechtigungen, Erfüllungsstatus von Anlagen und Luftfahrzeugbetreibern sowie bestimmte Kontoinformationen, wie z. B. Kontoinhaber.	Die Ausprägungen im heutigen System können ebenso in einem Blockchain System wiedergegeben werden.

Für den Betrieb eines DLT-Systems müssen grundsätzlich folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- ▶ Jeder Stakeholder ist eindeutig identifiziert und verfügt über eine rechtmäßige digitale Identität in Form der verschiedenen Kontotypen im Unionsregister. Kontobevollmächtigte Personen interagieren mit den Smart Contracts über ein Keypair, welches an den EU-Login gekoppelt ist.
- ▶ Alle Betreiber eines Blockchain-Nodes sind für die Mitwirkung für den Betrieb des private Blockchains des Emissionshandelsregisters zugelassen (permissioned).
- ▶ Alle Stakeholder verfügen über die technischen Voraussetzungen und Ausstattungen für das Mitwirken im DLT-basierten System.
- ▶ Es besteht eine Einigung über eine Governance, die das Regelwerk über das Was und das Wie für alle Stakeholder verbindlich darstellt.

4.5 Ergebniszusammenfassung

In diesem Kapitel wurde festgestellt, dass es technisch möglich ist, das heutige Unionsregister mit Blockchain-Technologie abzubilden. Dafür wurde ein Konzept für die Lösungsarchitektur als Basis für die technische Implementierung eines DLT-basierten EU-Emissionshandelssystems erarbeitet und mit dem heutigen System gegenübergestellt.

Für die Umsetzung wurden Anforderungen an eine DLT-basierte Architektur formuliert, die der technischen Ausformung als Richtschnur dienen sollen. Dabei wurde der Fokus auf solche Anforderungen gelegt, die den Transfer und die Verwaltung von Emissionsberechtigungen betreffen.

Daraus ergeben sich für die Lösungsarchitektur Infrastrukturkomponenten, die den ermittelten Anforderungen die nötige Funktionalität bieten. Um auch die Akzeptanz für ein DLT-basiertes

System aufrechtzuerhalten, wurde darauf geachtet, bestehende Prozesse und Systeme nicht wesentlich zu verändern, und andererseits das System für neue technische Komponenten offen zu gestalten. Grundsätzlich wurde festgestellt, dass Akteure und ihre Aktivitäten durch die grundlegenden Elemente einer DLT-Lösungsarchitektur, wie dem Betrieb der Netzwerkknoten, durch Smart Contracts und einer dezentralen Public Key Infrastruktur (DPKI) getragen werden können.

4.5.1 Kernkomponenten und -Prozesse

Zu dieser Lösungsarchitektur wurden zunächst einige Kernkomponenten definiert.

Das Betreiben der Nodes könnte hier wie bisher primär die EU-Kommission verantworten. Zugunsten höherer Manipulations- und Ausfallsicherheit können darüber hinaus aber auch die Mitgliedstaaten eigene Netzwerkknoten betreiben. Da nur vorher ausgewählte, und vertrauensvolle Akteure die Blockchain Nodes betreiben, kann der effiziente und performante Proof-of-Authority Konsensmechanismus angewandt werden.

Um die verschiedenen Kontenarten in einem DLT-basierten Unionsregister hinreichend abbilden zu können, können Smart Contract Templates für jede Kontoart definiert werden. Diese halten die Emissionsberechtigungen und erlauben die Umsetzung des heutigen Berechtigungsmodells durch vordefinierte Funktionen. Dieses Modell ist zudem skalier- und wiederverwendbar.

Von den Betreiberkonten (Smart Contracts) abzugrenzen sind die Accounts der Benutzer zur Identitätsverwaltung, durch die sie mit den Konten interagieren können. Dafür werden die bestehenden Accounts (EU-Login) im Backend mit einem Public-/Private Schlüsselpaar ausgestattet, mit denen sie im Blockchain-Netzwerk Transaktionen initiieren und signieren können und so mit den Konten als Smart Contracts interagieren können (EOA). Die Schlüsselverwaltung kann den Nutzern selbst oder der Systeminfrastruktur überlassen werden. Im ersten Fall sind ausreichende Backup- und Recovery Optionen zu schaffen.

Die Emissionsberechtigungen als weitere Kernkomponente gilt es als Token (Asset) abzubilden. Es wurde festgestellt, dass sich Non-Fungible Tokens (NFTs) besonders gut eignen. So können die einzelnen Token einer Handelsperiode durch eine Seriennummer differenziert werden und sind für sich gewissermaßen einzigartig. Da Emissionsberechtigungen aber auch gegeneinander eintauschbar sein sollen, bietet sich darüber hinaus der ERC1155 Standard an, wodurch Token auf Werteebene fungibel, aber auf Seriennummerebene nicht fungibel sind. Als solche Token können die Emissionsberechtigungen durch Smart Contracts abgebildet, verwaltet und den Akteuren im DLT-Unionsregister verfügbar gemacht werden.

Die grundlegenden Anwendungen und Prozesse im Unionsregister können somit von diesen Komponenten umgesetzt werden. Dazu zählen die Registrierung des Benutzerkontos, die Ausgabe und Abgabe von Emissionsberechtigungen, Auktionsprozesse und der Handel.

4.5.2 Erweiterungen und Potenziale

Über diese Kernkomponenten hinaus, gibt es zusätzliche Komponenten, die das Unionsregister funktionell stark erweitern können und großes Automatisierungspotenzial bieten.

Eine Komponente könnte die Integration von Privatpersonen darstellen, die dann ebenso im Emissionshandel teilnehmen können wie Betreiberkonten. Jedoch nicht über Smart Contracts, sondern direkt als EOA.

Während der Anfertigung dieser Machbarkeitsstudie stellte sich heraus, dass durch die Verwendung von Blockchain Technologie ein de-facto Standard zur Abbildung von

Emissionshandelssystemen erzielt werden kann, der sich auch für andere ETS eignet. Würden andere Emissionshandelsregister ebenso auf dieser Technologie basieren, ergeben sich hier große Potenziale zur Interoperabilität eines internationalen Netzwerks an Emissionshandelssystemen. Durch sogenannte "Bridges" oder dem "Inter Blockchain Communication" Protokoll können mehrere ETS miteinander für unterschiedlichste Zwecke kommunizieren. Dies beinhaltet, aber beschränkt sich nicht auf den Transfer von Emissionsberechtigungen zwischen zwei oder mehreren ETS. Gerade im Vorhaben der globalen Reduktion von neuen Emissionen rund um das Pariser Klimaabkommen bietet sich hier eine vielversprechende Möglichkeit, neue Wege und Maßnahmen zu implementieren. Wird sich für diesen Weg entschieden, kann dies von vorneherein besser von einem Private Cosmos SDK basierten Netzwerk als von Private Ethereum-basierten Blockchains abgebildet werden.

Als Erweiterung der bisherigen Form der Auktionierung sowie des Handels von Emissionsberechtigungen über die EEX und ECC bietet sich die Möglichkeit über Automated Market Maker (AMMs). Im Gegensatz zu traditionellen Verfahren erfolgt der Handel und die Auktion jeweils über einen Bonding Curve Smart Contract, die eine Gegenpartei für den Handel entbehrlich macht. Dies benötigt jedoch die Integration eines Blockchain-kompatiblen Clearing-Systems oder anerkannter "Stablecoins", die im Prinzip den Euro oder andere Währungen auf der Blockchain abbilden.

Im Gegensatz zu konventionell erstellten Benutzeraccounts, bietet sich durch SSI die Möglichkeit, dass sich Benutzer über sogenannte "Verifiable Credentials" identifizieren und authentifizieren können. Dadurch können Identitätsprüfungen stark automatisiert werden. Jedoch fehlt auch hier noch eine von offiziellen Behörden anerkannte und verifizierte Vertrauensinfrastruktur, welche klar regelt, welche Parteien "Verifiable Credentials" ausstellen und verifizieren dürfen als auch wie mit diesen interagiert werden kann. Diese Vertrauensinfrastruktur könnte jedoch bis zum Start eines Blockchain-basierten ETS bereits vorhanden sein.

5 Betrachtung Umsetzung

5.1 Zeitplan

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 1.1 beschriebenen Leitplanken und in Kapitel 4 dargestellten Lösungsarchitektur mit den technischen Anforderungen wurde ein Zeitplan und eine Kostenschätzung für die Erarbeitung eines Prototypens abgeleitet. Ein Prototyp stellt ein für die unter den Anforderungen beschriebenen Zwecke funktionsfähiges, aber auch vereinfachtes Versuchsmodell einer geplanten Lösung dar und dient als Vorbereitung für die tatsächliche Umsetzung des produktiven Systems. Mithilfe des Prototypens soll die Funktionalität sämtlicher Komponenten getestet und für den späteren Einsatz vorbereitet werden. Es soll dabei bereits die Fähigkeit besitzen, eine spätere Skalierung umsetzen zu können.

Der Zeitplan beinhaltet folgende Arbeitspakete (AP):

1. Projektkoordination
2. Technische Anforderungen
3. Lösungsarchitektur
4. Entwicklung des Prototypens

Projektkoordination: Plangemäße Durchführung der gesamten Entwicklung des Prototypens. Neben einem sachgemäßen Projektmanagement und Controlling, inkludiert dieses Paket die Koordination aller Projektkomponenten und den Austausch mit dem Auftraggeber.

Technische Anforderungen: Ableitung der technischen Spezifikationen für den Anwendungsfall Unionsregister und dessen Ansprüche aus der Nutzerperspektive, sowie die Ermittlung der Systemgrenzen. Daraus abgeleitet werden die fachlichen und technischen Anforderungen an die Lösungsarchitektur.

Lösungsarchitektur: Aus den fachlichen Anforderungen wird eine Gesamtarchitektur sowie eine technische Spezifikation erstellt. Sie beinhaltet: technische Grob- und Feinspezifikation des zu entwickelnden Systems, Konzept für Datenfluss und -aggregation, Smart Contract Manager, User Interface, Datensicherheitskonzept, Spezifikation für Kommunikation zwischen einzelnen Systemteilen, sowie Systemanbindungen für externe Anbieter (z.B. Emissionshandel), und Authentifizierungs- und Autorisierungs-Konzept.

Entwicklung des Prototypens: Entwicklung der Basiskomponenten der Unionsregister-Plattform für Kommunikation, Datenspeicherung und -verarbeitung sowie das Systems Management der Plattform und Services unter Verwendung der DLT.

Die folgende Übersicht zeigt die Arbeitspakete mit den geschätzten Personenmonaten im Zeitablauf mit den dazugehörigen Meilensteinen:

Tabelle 10: Übersicht Arbeitspakete mit geschätzten Personenmonaten im Zeitablauf

	Arbeitspaket	Monat												PM
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ges.
1	Projektkoordination	■	■	■										6,0
2	Technische Anforderung	■	■	■										3,0
3	Lösungsarchitektur				■	■	■							6,0
4	Entwicklung des Prototypens						■	■	■	■	■	■	■	12,0
	Gesamt													27,0
MS	Meilenstein													
1	Technischer Anforderungskatalog			X										
2	Technisches Konzept						X							
3	Demonstrator Mobility Collaboration Platform												X	

5.2 Kosten- und Aufwandsschätzung

Basierend auf den zuvor in Kapitel 5.1 definierten Arbeitspaketen wird hier eine Indikation für den Kostenaufwand abgeleitet. Da die Tagesätze je nach Dienstleistungsanbieter stark variieren, erfolgt die Kostenschätzung auf Basis von Personenmonaten. Als Hauptkostentreiber werden Personenaufwände gesehen. Infrastrukturkosten sind zu vernachlässigen. Ggf. kommen noch Rechtsberatungskosten hinzu. In Summe ergibt die indikative Schätzung einen Aufwand von 25,5 Personenmonaten, was ~500Tsd. € entspricht. Die Personenaufwände sind in der folgenden Tabelle detaillierter dargestellt.

Tabelle 11: Übersicht Personenaufwände je Arbeitspaket

Arbeitspaket / Arbeitsmodul	Personenmonate
1 Projektkoordinierung	6,0
Allgemeine Projektkoordinierung	1,0
Abstimmungsrunden mit dem Auftraggeber	3,0
Dokumentation	2,0
2 Technische Anforderungen	3,5
Anforderungen an Ethereum-Blockchain-Architektur	0,5
Anforderungen an die Ethereum-Knoten mit Parity Clients	0,5
Anforderungen an die DLT-Governance	0,5
Anforderungen an Smart Contract Implementierung	0,5
Anforderungen an Key Management	0,5
Anforderungen an Backend Einrichtung	0,5
Anforderungen an Frontend Oberfläche	0,5
3 Lösungsarchitektur	4,0
Konzept für Blockchain-Architektur	0,5
Konzept für die Ethereum-Knoten	0,5
Erstellung des DLT Governance	0,5
Konzept für Smart Contract Implementierung	0,5

Arbeitspaket / Arbeitsmodul	Personenmonate
Konzept für das Key Management	0,5
Konzept für Backend	0,5
Konzept für Frontend	0,5
Konzept für die Integration der Komponenten	0,5
4 Entwicklung des Prototypens	12,0
Integration der Lösungsarchitektur	9,0
Umsetzung des Prototypens	2,0
Testing	1,0
Gesamtaufwand	25,5

6 Effizienz und Nachhaltigkeit

Der Einsatz einer DLT-basierten Emissionsplattform unterscheidet sich anhand einiger Merkmale von konventionellen Webanwendungen. In diesem Kapitel werden dabei die Erfolgsfaktoren einer DLT-basierten Anwendung hervorgehoben und mögliche Ansatzwege in Form von Fragen beschrieben. Die folgenden Unterkapitel geben somit Anhaltspunkte über die Schwerpunkte, die bei der Behandlung der Analyse einzelner Aspekte gesetzt wurden.

6.1 Nutzbarkeit

Das Merkmal „Nutzbarkeit“ beschreibt die allgemeinen und anwendungsspezifischen Merkmale einer Blockchain-Umsetzung. Hierzu zählen (1) der Reifegrad der Technologie, (2) die Konfigurationsmöglichkeiten und Rollenmanagement, (3) die Wiederverwendbarkeit der Lösung, sowie (4) die Größe der Entwicklergemeinschaft eines jeweiligen Protokolls. Die Protokollempfehlung Private Ethereum mit dem EVM als „Betriebssystem“ ist sehr ausgereift und bietet viele Tools, was der großen Entwicklergemeinschaft geschuldet ist. Ein privates Netzwerk ist leicht aufsetzbar und wie in den Kapiteln zuvor beschrieben sind Emissionsberechtigungen durch Smart Contracts als NFTs abbildbar. Lösungen sind wiederverwendbar und könnten horizontal auf andere ETS angewendet werden. Cosmos als Private Ethereums „Challenger“ ist zwar jünger und möglicherweise nicht im selben Maße ausgereift, doch auch Cosmos hat Module wie das EVM und kann auf der EVM lebende Smart Contracts mit wenig Aufwand eins-zu-eins abbilden.

6.1.1 Reifegrad der Technologie

Der Reifegrad beschreibt die Fähigkeit der Technologie, operationell umgesetzt werden zu können. Hierzu zählen die folgenden Faktoren:

- ▶ Technische Einsatzbereitschaft der Technologie
 - Können bisherige Funktionen der Alt-Systeme weiterhin umgesetzt werden?
 - Ist die Ansicht des Nutzers vergleichbar bzw. fällt die Anwendungsfreundlichkeit der neuen Systemarchitektur des Unionsregisters mindestens so hoch aus wie die Vorherige basierend auf einer zentralen Datenbank?
 - Welchen Mehrwert schafft die Nutzung gegenüber der vorherigen Systemarchitektur?
 - Ist der Betrieb der Lösung abgesichert gegenüber Systemausfällen und Fremdangriffen?
- ▶ Technische Komplexität der Implementierung
 - Wie technisch komplex ist die Implementierung der Technologie?
 - Kann auf bestehende, bereits entwickelte Lösungen zurückgegriffen werden?
 - Wie hoch ist der Anpassungsbedarf des Protokolls, um die bestehende Lösung umzusetzen?
- ▶ Größe des Anbietermarktes / Alternativangebote
 - Wie groß ist der Anbietermarkt der Protokolle für die Umsetzung der Lösung?
 - Existieren erhöhte Machtpositionen der Protokoll-Betreiber?

- Kann während des Betriebs auf andere, gleichwertige Lösungen umgestiegen werden?
- ▶ Regulatorische Voraussetzungen für einen rechtskonformen Einsatz
 - Existieren regulatorische Rahmen für den Betrieb der Lösung?
 - Ist ein vorteilhaftes/nachteiliges Einschreiten des Gesetzgebers zu erwarten?

6.1.2 Konfigurationsmöglichkeit

Die Konfigurationsmöglichkeit bezieht sich auf die Möglichkeit, ein angedachtes Zielbild möglichst individuell und anwendungszentriert mit den dazu vorliegenden technischen Protokoll-Lösungen umsetzen zu können (für eine ausführliche Erklärung der unterschiedlichen Blockchain-Konfigurationen siehe Kapitel 3.1.1). Hierzu zählen die folgenden Faktoren:

- ▶ Steuerung der Zugriffsberechtigung
 - Welche Möglichkeit bietet das Protokoll, die Zugriffsberechtigung auf Transaktionen zu definieren?
- ▶ Steuerung der Autorisierung / Rollenmanagement
 - Welche Möglichkeit bietet das Protokoll hinsichtlich Autorisierung und Rollenmanagement?
- ▶ Steuerung der Visibilität
 - Welche Möglichkeit bietet das Protokoll die Visibilität der Transaktionen anzupassen?

6.1.3 Wiederverwendbarkeit der Lösung

Die Wiederverwendbarkeit der Lösung beschreibt den Umstand, die auf Basis eines Protokolls entwickelte Lösung teilweise oder in vollem Umfang für andere Anwendungen nutzbar machen zu können. Hierzu zählen die folgenden Faktoren:

- ▶ Wiederverwendbarkeit der technischen Protokoll-Architektur
 - Kann die technische Protokoll-Architektur für andere Anwendungen nutzbar gemacht werden?
- ▶ Wiederverwendbarkeit der Funktionalitäten, Daten und Datenstrukturen
 - Können erstellte Funktionalitäten, Daten und Datenstrukturen für andere Anwendungen nutzbar gemacht werden?

6.1.4 Größe der Entwicklergemeinschaft

Die Größe der Entwicklergemeinschaft beschreibt die Anzahl von Entwickler*innen, welche sich mit der Fortentwicklung eines bestimmten Protokolls beschäftigen. Allgemein weist eine hohe Anzahl von Entwickler*innen eines Protokolls eine hohes Innovations- und Fortentwicklungspotential auf. Hierzu zählen die folgenden Faktoren:

- ▶ Wie groß ist Anzahl der Entwickler*innen eines bestimmten Protokolls?
- ▶ Wie häufig werden Updates des Protokolls herausgegeben?

- ▶ Wie hoch ist die Anzahl von bereits umgesetzten Anwendungsfällen eines bestimmten Protokolls?

6.2 Skalierbarkeit und Performanz

Die Skalierbarkeit und Performanz sind wichtige Aspekte einer DLT-Lösung. Seit der Bitcoin an Popularität gewann und im Finanzmarkt die Fragestellung aufkam, ob Bitcoin andere Zahlungsanbieter überflüssig machen würde, ist die Skalierbarkeit im Fokus der Diskussionen. Das Bitcoin Netzwerk z.B. ist so aufgesetzt, dass alle 10 Minuten ein neuer Block erstellt wird. 7 Transaktionen pro Sekunde (TPS) werden vom Bitcoin Netzwerk verarbeitet. Verglichen mit Visas Transaktionsrate von über 4000 TPS ist das Bitcoin Netzwerk in seiner ursprünglichen Form nicht ausreichend skalierbar. Hingegen ist Private Ethereum basierend auf dem Proof-of-Authority (PoA) Konsensmechanismus wesentlich performanter als Public Ethereum (welches wie Bitcoin auf den PoW-Konsensmechanismus zurückgreift) und wird durch den Umstand ermöglicht, dass man ein geschlossenes und permissioned System aus vertrauenswürdigen Node-Betreibern vorfindet. Der vorgesehene hohe Durchsatz von Transaktionen in einem DLT-basierten EU-ETS gilt jedoch nur unter dem Vorbehalt der Einwilligung von betroffenen Kontoinhabern. Gegenwärtig ist eine Verzögerung von 24 Stunden für Transaktionen im EU-ETS vorgesehen, welche den Kontoinhabern eine zusätzliche Kontrollmöglichkeit bietet. Vor diesem Hintergrund werden die EU-Mitgliedstaaten und die EU KOM darauf kaum kurzfristig verzichten wollen. Die sofort ausgeführte Transaktion ist also eine Option für die Zukunft, die als erstes den Konsens der Mitgliedstaaten und danach eine Änderung des dem EU-ETS zugrunde liegenden Regelwerkes erfordert.

6.2.1 Konsensmechanismus

Der Konsensmechanismus ist einer der wichtigsten Aspekte, der sich signifikant auf die Skalierbarkeit einer DLT-Lösung auswirkt. Zum Beispiel nutzen Bitcoin und Ethereum derzeit den so genannten Proof-of-Work Konsensmechanismus (PoW). Das Grundprinzip des PoW besteht darin, dass die Miner zeitgleich versuchen, denselben neuen Block zu erstellen, um als Erster eine Belohnung zu erhalten. Der PoW hat diverse Vorteile, vor allem im Bereich der Sicherheit, allerdings benötigt er eine Vielzahl an Ressourcen und ist nur geringfügig skalierbar. Aus diesem Grund ist geplant, Ethereum in naher Zukunft auf ein Proof-of-Stake (PoS) Konsensmechanismus umzustellen, um die Skalierbarkeit der Plattform zu gewährleisten. Es ist von einer Effizienzsteigerung von PoW zu PoS von ca. 99% auszugehen.

- ▶ Welcher Konsensmechanismus wird im Protokoll verwendet?
- ▶ Was sind die Mindestanforderungen an den Konsensmechanismus?
 - Müsste man sich zwischen Dezentralisierung, Sicherheit und Skalierbarkeit entscheiden, welche zwei Eigenschaften genießen die höchste Priorität?

6.2.2 Nodes

Wie in Kapitel 3 besprochen, ist eine private permissioned Ethereum-Blockchain zu empfehlen. Es gilt zu klären, wer die Nodes innerhalb dieses Netzwerkes betreiben darf.

- ▶ Dürfen z.B. nur die jetzigen Registerverwaltungen eines Landes Nodes betreiben oder dürfen andere Akteure ebenfalls Nodes betreiben?
- ▶ Wie wird der Governance Prozess bzgl. des Hinzufügen von Nodes gestaltet?

6.2.3 Anwendungsfall

Die Skalierbarkeit einer DLT Lösung, sowie potenzielle Probleme, sind abhängig von dem Anwendungsfall.

- ▶ Wie hoch ist der erwartete Ansturm auf das System?
 - Welche Anzahl von TPS muss das System mindestens abwickeln können?
- ▶ Anzahl der Nutzer
 - Wie ist das Verhältnis zwischen Anzahl der Nutzer und der Performanz? Kann das System der Arbeitsbelastung zu Stoßzeiten standhalten?
 - Können neue Klienten schnell und sicher Zugang erhalten?

6.2.4 Zukünftige Erweiterungen

Zukünftige Erweiterungen eines DLT-basierten Systems erfordern Skalierbarkeit. Zwar spielen die TPS im Unionsregister bisher keine primäre Rolle, allerdings könnte in einem späteren Schritt weitere Handelsstellen an das DLT-basierte System angeschlossen werden. In diesen Fällen sollte beachtet werden:

- ▶ Können zukünftig andere Metriken wie z.B. die TPS einen höheren Stellenwert erhalten?
 - Sollte das DLT-basierte Emissionshandelsregister global ausgeweitet werden und möglicherweise Nicht-EU-Emissionsberechtigungen auf dem EU-ETS gehandelt werden können: Könnten die TPS relevant werden, um die zeitgemäße Abwicklung der Transaktionen zu gewährleisten?
- ▶ Potenzielle Weiterentwicklungsmöglichkeiten
 - DLT Systeme entwickeln sich kontinuierlich weiter (z.B. Lightning Network von Bitcoin). Die Integration von so genannten „second-layer“ Applikation ist im Vorfeld abzuklären

6.3 Interoperabilität

Die Interoperabilität wurde bereits in Kapitel 4 als ein wichtiger Treiber der Lösungsarchitektur besprochen. Das Merkmal „Interoperabilität“ beschreibt das Vorhandensein von Daten- und Schnittstellen zwischen verschiedenen Blockchains und zwischen einer Blockchain und bestehenden Systemen, um die Übertragung von Werten und Informationen zu gewährleisten. Bei der Beleuchtung der Interoperabilität sollte insbesondere auf folgende Faktoren eingegangen werden: (1) Interoperabilität zu anderen ETS, (2) Interoperabilität zu bestehenden Systemen, (3) Standardisierung. Im Hinblick auf die Protokollempfehlung Private Ethereum ist hervorzuheben, dass Ethereum Smart Contracts zum großen Teil bereits standardisiert sind, gerade in Bezug auf NFTs (siehe hierzu bspw. die in Kapitel 4.3 aufgeführten Ethereum Request for Comment (ERC) Standards). In Bezug auf Interoperabilität besteht ein riesiges Potential, neue Wege zu finden, den globalen Emissionshandel zu gestalten, sobald andere ETS ebenfalls einen Blockchain-Ansatz befolgten. Es bleibt spannend abzuwarten, ob und wenn ja, für welches DLT-Protokoll sich andere ETS entscheiden werden. Falls auf Private Ethereum die Wahl fällt, so existieren Bridges, um zwei Ethereum-basierte Blockchains miteinander zu verbinden. Allerdings werden solche Brücken nicht nativ unterstützt. Es sei explizit darauf hingewiesen, dass wenn perspektivisch Interoperabilität zwischen verschiedenen DLT-basierten ETS

gewünscht wird, man jetzt schon auf Cosmos umstellen sollte, da Cosmos mittels des IBC-Protokolls Interoperabilität zwischen verschiedenen Blockchains nativ unterstützt⁴.

6.3.1 Interoperabilität zu anderen ETS

In vielen Fällen ist die Bildung von nicht untereinander kommunikationsfähigen Blockchain-Silos unerwünscht. So ist durch das Fehlen einer souveränen Rechtsetzungsinstanz auf internationaler Ebene nicht gewährleistet, dass Staaten und private Akteure sich automatisch auf Mechanismen einigen, welche die Interoperabilität verschiedener Systeme sicherstellen. Dies wäre der Fall, falls auch andere Jurisdiktionen außer der EU – angenommen sie entschlöße sich zur Adoption eines Blockchain-Unionsregisters – auf eine DLT-basierte Registerarchitektur für die Aufzeichnung von Emissionsberechtigungstransaktionen zurückgreifen. Wie bereits vorausgehend erwähnt, sind zahlreiche Blockchain-Konfigurationen für jedes Anwendungsfeld denkbar, obgleich bestimmte Blockchain-Konfigurationen geeigneter sind als andere. Letztendlich ist die Blockchain-Konfiguration auch eine Frage der persönlichen und auf das eigene Umfeld abgestimmten Präferenz und Gewichtung von einzelnen Aspekten, sodass sich das Aufstellen einer universal gültigen Rangordnung verwehrt. Dies impliziert, dass die Möglichkeit eines Flickenteppichs, bestehend aus einzelnen DLT-basierten ETS, nicht ausgeschlossen werden kann. Folgende Faktoren müssen bei der Interoperabilität zwischen verschiedenen ETS berücksichtigt werden:

► Technische Faktoren

- Implementieren die verschiedenen ETS dasselbe Blockchain-Protokoll oder basieren diese auf unterschiedlichen Blockchain-Protokollen?
- Können die Blockchains für andere Blockchains eine Oracle-Funktion erfüllen bzw. können Smart Contracts einer Blockchain ausführbare Aufträge an andere Blockchain-Netzwerke erteilen und Informationen auslesen?
- Ist der Transfer von Token (bspw. Emissionsberechtigungs-NFTs) zwischen verschiedenen Blockchains gewährleistet?
- Besteht eine Übersetzbarkeit von Smart Contract Sprachen in andere Smart Contract Sprachen?

► Governance-Faktoren

- Wie weit erstreckt sich der “Einflussbereich” von Validatoren? Können diese bei einer ETS-übergreifenden Transaktion nur innerhalb ihres ETS Veränderungen ausführen und müssen auf die spiegelbildliche Reaktion durch Validatoren des anderen ETS warten?
- Erlauben interoperable Smart Contracts die Übertragung von Emissionsberechtigungen innerhalb eines einzelnen ETS-übergreifenden Transaktionsprozesses?
- Wie hat eine Stornierung einer fälschlich getätigten Transaktion zu erfolgen? Wer hat dies zu prüfen und zu autorisieren?⁵

⁴ <https://docs.cosmos.network/master/ibc/overview.html>

⁵ Eine Stornierung würde durch eine Gegentransaktion auf der Blockchain abgebildet werden.

► **Rechtliche Faktoren**

- Inwiefern stellen Transaktionen von Emissionsberechtigungen innerhalb eines und insbesondere zwischen verschiedenen ETS ein neues rechtswirksames Eigentumsverhältnis dar?
- Besteht eine finanzaufsichtsrechtliche Kongruenz in der Jurisdiktions-übergreifenden Bewertung von Emissionsberechtigungs-NFTs? Sind diese in jeder Jurisdiktion an dieselben Rechte und Pflichten verbunden?
- Sind die Gesetzgeber technologieneutral oder ist bereits anhand von Gesetzesentwürfen eine technologische Präferenz abzuleiten?

6.3.2 Interoperabilität zu bestehenden Systemen

Die oben benannten Faktoren finden auch in den nachfolgenden Punkten Berücksichtigung, wemgleich das Augenmerk dem Vorhandensein von interoperablen Ökosystem-Elementen gilt:

► **Schnittstelle zu klassischen Währungen**

- Der Handel mit Emissionsberechtigungs-NFTs impliziert einen Tausch gegen gesetzliche Zahlungsmittel beim Kauf und Verkauf. Damit es nicht zu Systembrüchen zwischen dem DLT-basierten ETS und den konventionellen Finanzstrukturen kommt, erfordert es die Abbildung gesetzlicher Zahlungsmittel wie dem Euro auf eine DLT. Eine zentrale Frage hierbei ist, welche Formen eines digitalen Euros sich langfristig durchsetzen werden. Kann sichergestellt werden, dass die digitalen Euro Token auf der ETS abgebildet werden können?
- Kurzfristig sind auch sogenannte Trigger-Lösungen (Brückenlösungen) für die Abwicklung von Emissionsberechtigungs-NFTs realisierbar, welche über Smart Contracts simple Zahlungsaufträge innerhalb eines konventionellen Zahlungssystems (bspw. SEPA) auslösen können.

► **Schnittstelle zu Handelsbörsen**

- Nicht nur das Unionsregister, sondern auch die Handelsbörsen, Clearinghäuser und ihre Geschäftslogiken könnten auf einer DLT abgebildet werden und durch die Automatisierungsfähigkeit von Smart Contracts könnten Effizienzgewinne für den Europäischen Emissionshandel eingebracht werden.

► **Schnittstelle zu Krypto-Wallets und Custody-Providern**

- Stehen den Teilnehmern des Europäischen Emissionshandels (Anlagen- und Luftfahrzeugbetreiber, Händler, Handelsbörsen, Prüfstellen, die Europäische Kommission und nationale Emissionshandelsstellen) technische Tools und Services zur Verfügung, um Einsicht in ihren Bestand und ihre Transaktionshistorie zu nehmen?
- Können gegenwärtige Krypto-Wallets und Custody-Provider von ETS-Blockchains Informationen abfragen?

6.3.3 Standardisierung

Standardisierungen können das Entstehen von Systembrüchen zwischen verschiedenen Blockchains verhindern. Hierfür erforderlich sind Abstimmungen und Einigungen bzgl. technischer Schnittstellenausgestaltung, Datenformaten, Datenspeicherung,

Verschlüsselungsalgorithmen, etc. Zwar können solche Regeln anwendungs- als auch branchenspezifisch getroffen werden. Beim internationalen Emissionshandel sollte der geografische Geltungsbereich dieser Regeln möglichst breit gefasst sein. Dem steht allerdings auch ein höherer Einigungsaufwand aufgrund einer höheren Zahl an Akteuren entgegen. Einige Kernbereiche werden adressiert:

- ▶ Standardisierungsorganisation:
 - Es existiert das technische Komitee ISO/TC 307 (“Blockchain and distributed ledger technologies”), welches sich mit Standardisierungen zu Blockchain und DLT befasst. Die veröffentlichten Standards gilt es in regelmäßigen Abständen zu prüfen. Zu den Standards, mit denen sich die ISO befasst gehören u.a. die Harmonisierung des Vokabulars, also Begriffsdefinitionen, der Datenschutz, Interaktionen zwischen verschiedenen Smart Contracts als auch das Sicherheitsmanagement von Vermögenswerten

6.4 Sicherheit

Das Merkmal „Sicherheit“ beschreibt die Resilienz eines Protokolls gegenüber unbefugtem Zugriff auf Daten (sog. Angriffs-Resilienz). Folgendermaßen wird der Grad der Sicherheit eines Protokolls (1) durch den verwendeten Konsensmechanismus, (2) die Verteilung der Netzwerk-Knoten (Nodes), (3) die verwendete Kryptographie, (4) den Umgang mit dem Datenschutz, (5) die Bekämpfung von Betrugsmodellen und Unterstützung von Ermittlungsbehörden und (6) durch die Prüfung und Ausgestaltung von Smart Contracts beschrieben. Das Settlement-Layer des Ethereum Protokolls ist sehr sicher. Potenzielle Angriffsvektoren würden sich z.B. durch fehlerhaften Smart Contract Code eröffnen⁶. Allerdings können Peer-Reviews oder Audits dieses Risiko minimieren, zumal durch Heranziehung von bewährten Standards aus Open-Source Smart Contract Code Bibliotheken man auf Erfahrungswerte zurückgreifen kann. Ein anders gelagertes Problem kann als Management-Problem bezeichnet werden. Es ist durchaus denkbar, dass eine Entität versucht, signifikante Mengen an Emissionsberechtigungen aufzukaufen, um somit eine für ihn vorteilhaften Marktsituation zu schaffen bzw. um andere zu schaden. Um solche Szenarien zu verhindern, können solche Risiken, die die Integrität des ETS schaden können, technisch umgangen werden, indem man z.B. ins Regelwerk eine Obergrenze definiert. Wie genau und wie hoch solche Mechanismen ausgestaltet werden sollten, könnte man zu einem späteren Zeitpunkt in einer Machbarkeitsstudie untersuchen.

6.4.1 Konsensmechanismus und Verteilung der Knoten

Der Begriff des „Konsensmechanismus“ bezieht sich auf dem inhärenten Protokoll-Algorithmus, welcher verwendet wird, um eine Einigung über den Status eines Netzwerkes zwischen den Protokoll-Teilnehmern zu erzielen. Im Kontext von DLT-Systemen wird über den Konsensmechanismus sichergestellt, dass alle Netzwerkteilnehmer eine identische und somit gültige Kopie des Registers besitzen. Je nach Konfiguration des Protokolls kann der zugrundeliegende Algorithmus variieren (siehe Kap. 4.1.1). Die Auswahl des Konsensmechanismus ist entscheidend für die Sicherheit eines Netzwerkes. Hierzu zählen die folgenden Faktoren:

⁶ https://consensys.github.io/smart-contract-best-practices/known_attacks/

- ▶ Absolute Anzahl der Knoten (primär zutreffend bei öffentlichen Blockchains)
 - Ist die Anzahl der Knoten ausreichend für eine redundante und verteilte Speicherung des Registers, um eine Manipulation von Einträgen durch Netzwerkteilnehmer zu verhindern?
 - Ist die Anzahl der Knoten ausreichend für eine redundante und verteilte Speicherung des Registers, um einen teilweisen Netzwerkausfall zu kompensieren?
- ▶ Geografische Verteilung der Knoten (primär zutreffend bei öffentlichen Blockchains)
 - Ist der Standort der Netzwerk-Knoten geografisch gleichmäßig verteilt, um eine teilweise Manipulation von Einträgen durch Netzwerkteilnehmer eines bestimmten geografischen Ortes zu verhindern?
 - Ist der Standort der Netzwerk-Knoten geografisch gleichmäßig verteilt, um einen teilweisen Netzwerkausfall an einem bestimmten geografischen Ort zu kompensieren?
- ▶ Institutionelle Verteilung der Knoten (primär zutreffend bei öffentlichen Blockchains)
 - Besitzen einzelne Unternehmen oder Interessensvereinigungen eine signifikante Anzahl an Knoten, was zu einer Netzwerkmanipulation oder Interessenskonflikten führen könnte?
- ▶ Incentivierungs-Mechanismus (primär zutreffend bei öffentlichen Blockchains)
 - Werden Netzwerkteilnehmer für die korrekte Validierung von Transaktionen incentiviert?
 - Ist der Incentivierungs-Mechanismus derart gestaltet, dass nicht netzwerk-konforme Netzwerkteilnehmer bestraft werden oder vom Konsensmechanismus ausgeschlossen werden können?
- ▶ Netzwerk-Governance (primär zutreffend bei konsortialen/privaten Blockchains)
 - Kann bestimmt werden, welche Netzwerkteilnehmer Transaktionen validieren?
 - Kann bestimmt werden, dass Netzwerkteilnehmer zu jeder Zeit zum Konsensmechanismus hinzugefügt oder entfernt werden?

6.4.2 Verwendete Kryptografie

Kryprographie beschreibt die Verschlüsselung von Informationen. Dafür werden Informationen vor der Übertragung verschlüsselt und erst vom befugten Empfänger wieder entschlüsselt. Im Kontext von DLT-Systemen werden die folgenden Charakteristiken betrachtet:

- ▶ Verfolgung der zentralen Ziele der von dem DLT-System verwendeten Kryptografie
 - Ist die Vertraulichkeit gewährleistet? Ist sichergestellt, dass Informationen von Dritten nicht verstanden werden können?
 - Ist die Verbindlichkeit gewährleistet? Ist sichergestellt, dass die Übermittlung von Informationen nicht nachträglich bestritten werden kann?
 - Ist die Integrität gewährleistet? Ist sichergestellt, dass Informationen nicht verändert werden können?

- Ist die Authentizität gewährleistet? Ist sichergestellt, dass sich Absender und Empfänger jeweils bestätigen können?
- ▶ Verwendung von geeigneten Verschlüsselungsverfahren
 - Verwendet das DLT-System ein asymmetrisches Verschlüsselungsverfahren?
 - Wird durch die Verwendung von Hash-Funktionen die Integrität von verschlüsselten Informationen gewährleistet?
 - Ist die verwendete Kryptografie in eine Post-Quantum-Kryptografie überführbar, selbst wenn hochleistungsfähige Quantencomputer entwickelt werden? Hierzu hat das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) Handlungsempfehlungen ausgesprochen.⁷

6.4.3 Datenschutz

Datenschutz im Kontext von DLT-Systemen bezieht sich auf die Fähigkeit des Blockchain-Protokolls, gesetzliche, wie auch firmeninterne Regelungen zum Datenschutz umsetzen zu können. Besonders bei öffentlichen Blockchains sorgt ein hoher Grad an Transparenz zu Datenschutzbedenken. Allerdings ist ein Hoher Grad an Transparenz und Datenschutz nicht zwangsläufig ein Widerspruch. Durch geeignete Maßnahmen lassen sich geltende Datenschutzregeln umsetzen. Hierzu zählen die folgenden Faktoren:

- ▶ Encryption- und Decryption-Keys
 - Lassen sich Daten mit Encryption und Decryption Keys erstellen? Kann der Decryption-Key im Falle einer Datenlöschung gelöscht werden?
- ▶ Kontrolle des Dateneigentümers
 - Lässt sich dem Eigentümer der Daten ein Private Key zur Verfügung stellen, welcher dem Eigentümer volle Kontrolle über die Daten gibt?
- ▶ Datenreferenzierung
 - Lassen sich Daten in einer referenzierten, verschlüsselten Datenbank außerhalb der Blockchain ablegen und lediglich der Pointer und Hash auf der Blockchain speichern?

6.4.4 Bekämpfung von Betrugsmodellen und Unterstützung von Ermittlungsbehörden

Durch die Nutzung einer permissioned DLT können Straftaten einfacher entdeckt werden, da im Voraus bekannt ist, welche natürlichen und juristischen Personen Zugang zum EU-ETS haben und da sie sich auszuweisen haben, wird zudem auch passiv die Prävention von Straftaten gewährleistet. Darüber hinaus können Ermittlungsbehörden unmittelbar Zugriff auf die Blockchain-Daten erhalten und somit Informationen wie bspw. Transaktionsursprung, Transaktionsempfänger und Authentifizierungsverfahren auslesen. Insgesamt wird dadurch die Integrität des Emissionshandels gestärkt. Dieser Aspekt ist bei der Feinplanung eines Prototypen weiter auszuführen. Wesentliche Faktoren sind jedoch:

⁷ <https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Krypto/Post-Quanten-Kryptografie.pdf?blob=publicationFile&v=1> (Zugriff am 7. März 2022).

► Prävention von Betrug

- Ist der DLT-basierte Unionsregister so konfiguriert, dass Zugangsbeschränken explizite Autorisierungen von offiziellen und bekannten Stellen erforderlich machen?
- Ist den Teilnehmern des DLT-basierten Unionsregisters bekannt, dass identifikations- und transaktionsrelevante Daten von der Blockchain grundsätzlich unumkehrbar und manipulationsresistent gespeichert werden?

► Entdeckung und Verfolgung von Betrug

- Sind die autorisierten Entitäten und notwendige Identifikationsmerkmale den zuständigen öffentlichen Stellen bekannt bzw. von ihnen herauszufinden?
- Haben Strafverfolgungsbehörden die notwendigen Mitteln und das Know-How, um DLT-Daten abzurufen und auszulesen?

6.4.5 Prüfung und Ausgestaltung von Smart Contracts

Smart Contracts ermöglichen es Blockchain-Systemen, den Austausch von Informationen und Werten zu automatisieren. Geschäftsprozesse können so nach einer vordefinierten Logik teilweise oder vollständig und ohne menschlichen Eingriff abgewickelt werden. Allerdings sind Smart Contracts in der Regel die anfälligsten Punkte für Cyberangriffe und Technologieausfälle. Wie jeder andere Softwarecode erfordern auch Smart Contracts robuste Tests und angemessene Kontrollen, um potenzielle Risiken für Blockchain-basierte Geschäftsprozesse zu mindern. Hierzu zählen die folgenden Faktoren:

► Entwicklung

- Wird auf die größten und angesehensten Bibliotheken bei der Entwicklung von Smart Contracts zurückgegriffen?
- Wurde auf ausreichend Entwicklungszeit für die Erstellung des Smart Contracts geachtet?

► Zertifizierung

- Existieren (bereits) staatliche anerkannte Sachverständige auf nationaler bzw. EU-Ebene, welche Smart Contract Audits durchführen können?
- Wurde eine reputable IT-Sicherheitsfirma beauftrag, die Smart Contracts auf Sicherheitslücken zu überprüfen?
- Existiert ein regelmäßiger Testzyklus für Smart Contract Audits?

6.5 Nachhaltigkeit

Das Merkmal "Nachhaltigkeit" beschreibt die Minimierung des ökologischen Fußabdruckes des DLT-Unionsregisters. Es umfasst die Umweltdimensionen (1) Klimaschutz, (2) Energieeffizienz und (3) Ressourcenschonung sowie den (4) Open-Source-Ansatz. Durch die Wahl auf Private Ethereum in Verbindung mit PoA halten sich Hardwareansprüche und der Energieverbrauch in Grenzen. Um das Netzwerk am Laufen zu halten sind Computer mit einer gewöhnlichen Leistungsstärke ausreichend. Spezielle Hardware ist grundsätzlich nicht erforderlich. Das PoA ist geeignet für private permissioned Blockchains, da einzelnen Teilnehmern die Möglichkeit eingeräumt wird, eigenständig Transaktionen zu validieren.

6.5.1 Klimaschutz

- ▶ Strom aus erneuerbarer Energie
 - Kommt der Strom aus grünen Quellen?
 - Wurde auf die Nutzung von fossilen Energiequellen verzichtet?

6.5.2 Energieverbrauch

- ▶ Konsensmechanismus/Rechenaufwand minimieren
 - Welcher Konsensmechanismus minimiert den Rechenaufwand, ohne die Sicherheit und Skalierbarkeit wesentlich zu beeinträchtigen?
 - Wird es vermieden, auf das rechen- und damit energieintensive PoW-Konsensmechanismus zurückzugreifen?
 - Kann beim gewählten Modell davon ausgegangen werden, dass der Energieverbrauch maximal linear mit der Größe des Systems (Zahl an Transaktionen/Nutzer) steigt?
- ▶ Schlankes Datenmanagement und -speicherung
 - Mit jedem neuen Block bzw. Datensatz steigt das Speichervolumen und somit auch der Energieverbrauch für das Datenmanagement. Existieren Möglichkeiten von Pruning und off-chain Datenspeicherung?
- ▶ Besteht die Möglichkeit zur Umstellung auf neuere umweltfreundlichere Konsensmechanismen? Besteht die Möglichkeit der Außerbetriebnahme eines veralteten DLT-Systems, ohne dass Disruption die Angreifbarkeit des Systems erhöht?
Messung/Bilanzierung
 - Welche Indikatoren werden zum Vergleich herangezogen? Z.B. Energieverbrauch pro Transaktion vs. Hashrate
 - Was gehört zur DLT? Welche Elemente des unterstützten Ökosystems werden zum Bezugsrahmen hinzugezählt?

6.5.3 Ressourcenschonung

- ▶ Langlebigkeit von Hardware und nachhaltige Herstellung
 - Besteht die Möglichkeit auf bestehende Rechner und Infrastrukturen zurückzugreifen?
 - Beruht die Beschaffung der Ausrüstungen auf transparenten und nachhaltigen Lieferketten mit minimiertem ökologischem Fußabdruck?
 - Erfordert das DLT-Design kontinuierliche Hardware-Updates? Können Hardware-Updates durch Software-Updates hinausgezögert oder gar ersetzt werden? Wie frequent sind die Update-Zyklen?
 - Kann die ausgediente Hardware sozio-ökologisch recycelt werden und einem nachhaltigen Rohstoffkreislauf hinzugeführt werden?

► Ressourceneinsatz minimieren

- Ist die Lösung trotz DLT-Ansatz am Prinzip der Datenschlankheit ausgerichtet? Werden die übermittelten Daten minimiert durch Nutzung von off-chain Komponenten?
- Erfüllen die Rechenzentren und Infrastrukturen Effizienzkriterien?
- Werden Energie- und Umweltkosten im Geschäftsmodell berücksichtigt (z.B. durch CO2 Kompensation)?

6.5.4 Open-Source-Ansatz

► Open-Source und Crowd-Reviewing

- Soll der Quellcode öffentlich verfügbar sein?
- Ist es erwünscht, dass der Code von der Entwickler Community eingesehen bzw. getestet werden kann?

► Wiederverwendbarkeit auf andere Use Cases

- Ist die entwickelte Lösung wiederverwendbar für andere Projekte (z.B. die Adoption der Lösung für andere EU-Mitglieder)?
- Kann ggf. eine existierende Lösung angepasst werden für die Anforderungen des Emissionshandelsregisters?

6.6 Kosteneffizienz

Die Kosteneffizienz ist ein wichtiger Aspekt bei der Auswahl eines Protokolls. Vor allem im Jahr 2021 hat sich gezeigt, dass Blockchain-Protokolle, auf denen Transaktionen immer als kostengünstig angepriesen wurden, erhebliche Transaktionskosten mit sich bringen können. Zum Beispiel erreichten Transaktionsgebühren auf der Public Ethereum-Blockchain Preise von über 100€ pro Transaktion. Auch auf der Bitcoin Blockchain wurden Transaktionsgebühren von über 50€ pro Transaktion erreicht. Die folgenden Aspekte sollten bei einer Implementierung bedacht werden, um die Kosteneffizienz zu gewährleisten: Bei öffentlichen Netzwerken kann es zu erheblichen Transaktionskosten kommen, wenn das Netzwerk überladen ist. Bei privaten Netzwerken wie bei Private Ethereum hingegen sind die Kosten überschaubar. Während der PoW-Konsensmechanismus wenig skalierbar ist und zu einer hohen Auslastung und entsprechend hohen Kosten führen kann, kann im Falle des PoA-Konsensmechanismus des empfohlenen Public Ethereum gänzlich auf ein Incentivierungsmechanismus verzichtet werden, sodass die Transaktionskosten minimiert werden können. Laufende Kosten fokussieren sich deshalb hauptsächlich auf das Management.

6.6.1 Laufende Kosten

- Ist die Blockchain public oder private?
- Welcher Konsensmechanismus wird verwendet?
- Ist die Transaktionsgebühr gleichbleibend oder abhängig von der Komplexität der Transaktion
- Wie hoch sind die laufenden Kosten der aktuellen Infrastruktur?

- ▶ Was soll und kann automatisiert werden? Wie hoch sind die potenziellen Kosteneinsparungen durch Blockchain-basierter Automatisierung von Prozessen?

6.6.2 Einmalige Kosten

Die einmaligen Kosten für ein Implementierungsprojekt dieser Größenordnung sollten in der Planung berücksichtigt werden. Kapitel 5 listet bereits eine Schätzung der Aufgaben und der dazugehörigen Personenmonate auf. Die einmaligen Kosten sollten gegen folgende Fragen abgewogen werden:

- ▶ Was kostet eine nicht-Blockchain-basierte Implementierung?
- ▶ Wie hoch sind die langfristigen Kosten (z.B. verstärkte Instandhaltungskosten) über die nächsten Jahre, wenn keine neue Implementierung vorgenommen wird?
- ▶ Welche Kosten würden zukünftig mit einer hoch automatisierten Lösung gespart werden können?

7 Fazit und Ausblick

7.1 Fazit Machbarkeitsstudie

Auf die Fragestellung, ob und wie Blockchain Technologie zur Abwicklung des Emissionshandels genutzt werden kann, wird in dieser Machbarkeitsstudie klar mit "Ja" geantwortet. Es können sowohl technische Details als auch administrative Prozesse und Berechtigungen umgesetzt werden, ohne dabei die Souveränität der Aussteller der Emissionsberechtigungen im Vergleich zur heutigen Umsetzung zu verändern.

Der Einsatz von Smart Contracts und das Verknüpfen von Schlüsselpaaren zu bestehenden Accounts kann das Fundament bilden, um heutige Prozesse und Rollen des Unionsregisters auf Blockchain Technologie abzubilden. Für jeden Kontentyp kann eine Vorlage eines Smart Contracts erstellt werden, welche automatisch für beispielsweise Anlagenbetreiber individuell erstellt wird. Diesem Smart Contract können dann die Adressen bzw. die Accounts von kontobevollmächtigten Personen zugewiesen werden. Ebenso ermöglicht diese Infrastruktur eine zukünftige Integration von Privatpersonen in Form von Externally Owned Accounts (EOAs).

Während die Blockchain somit im Rahmen des Unionsregisters genutzt werden kann, so sollte wie bei jeder Technologie-Entscheidung der Einsatz von Technologie einem fachlichen Nutzen dienen. Wie in Kapitel 4 dargestellt, bietet die Blockchain Technologie ebenfalls wesentliche Vorteile beim Handel und bei der Identitätsverwaltung. So können Emissionsberechtigungen für jede Handelsperiode als Non-Fungible Tokens (NFTs) abgebildet und mit einer Seriennummer der Emissionsberechtigung (heute sogenannte "Blocknummer") verknüpft werden. Dies ermöglicht nicht nur das Wiederverwenden von bestehenden Prozessen und Systemen, sondern ermöglicht in Zukunft, den Handel zu dezentralisieren und das Anlegen von Konten mithilfe von SSI stark zu automatisieren.

Als unterliegende Blockchain hat sich eine eigene Ethereum-Blockchain derzeit als am geeignetsten erwiesen, da es hier vor allem langjährige Erfahrungswerte und eine große Community gibt sowie geeignete de-facto Standards wie ERC1155 zur Verfügung stehen. Jedoch könnten in Zukunft auch ähnliche Smart Contract Blockchains wie z. B. das Cosmos Netzwerk diesen Vorsprung einholen und durch deren Charakteristiken, wie in diesem Fall eine verbesserte Interoperabilität für eine horizontale Skalierung zu anderen Blockchain-basierten ETS-Lösungen anderer Jurisdiktionen, glänzen. Perspektivisch könnten so beispielsweise Emissionsberechtigungen aus dem amerikanischen Raum in das EU-ETS integriert werden und vice versa und somit den globalen Emissionshandel revolutionieren.

Um nun im Hinblick auf ein Unionsregister 2030 technische Architekturentscheidungen zu treffen, wird empfohlen, ein Big-Picture über das Unionsregister hinaus zu definieren in Form einer technologie-unabhängigen Vision 2040 für ein idealtypisches weltweites Model zum Umgang mit Emissionsberechtigungen. Diese Vision kann utopisch sein, wird jedoch als Richtungsweisung helfen, um über künftige Weiterentwicklungen zu entscheiden.

Um einen maximalen technologischen Fortschritt zu gewährleisten, sollten innerhalb der Vision 2040 nicht auflösbare Einschränkungen identifiziert werden. Tendenziell verleiten nicht auflösbare Einschränkungen dazu eine Vision 2040 in eine Vision 2030 abzuschwächen, um die Ziele greifbarer und realistischer zu gestalten. Unsere Empfehlung ist es die Vision 2030 als Zwischenschritt der Vision 2040 zu positionieren, um trotz gegebener Einschränkungen langfristig den maximalen Wert schöpfen zu können. Zu den zu betrachtenden Einschränkungen zählen bspw. technische und regulatorische Einschränkungen, sowie politische Abhängigkeiten.

Nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts ist es sehr wahrscheinlich, dass die Einbeziehung des Handels von Emissionsberechtigungen via Blockchain und SSI bei der Vision 2040 eine Rolle spielen werden.

7.2 Vision 2040

Eine Inspiration für die Vision 2040 stellt das auf einer public Blockchain betriebene KlimaDAO Projekt (<https://www.klimadao.finance/>) dar. Das hier idealtypisch und auf Spieltheorie basierende Konzept macht CO₂-Zertifikate durch Klima-Token frei handelbar und erzeugt somit, durch die Unterstützer von KlimaDAO getrieben, einen Sog-Effekt (schwarzes Loch) für CO₂-Zertifikate. Während dieses Projekt eine idealtypische Utopie darstellt, so kann es als Inspiration für die Vision 2040 für ein „perfektes“ CO₂ Zertifikate Schema dienen. Wir empfehlen, bspw. in einem „Future Foresight“ Workshop genau ein solches Wunsch-Zielbild zu entwickeln, um sich wie im vorigen Unterkapitel beschrieben daran als „Nordstern“ orientieren zu können. Basierend auf dem so entwickelten Zielbild können mittels neuer Technologien wie Blockchain maximal gewinnbringende Zwischenschritte definiert und umgesetzt werden.

Durch die Verwendung von Blockchain Technologie und der damit verbundenen hohen Innovationsdichte könnte auch ein Blockchain-basiertes ETS davon profitieren. Deshalb gilt es, die aktuellen Entwicklungen zu verfolgen und offen zu sein, sinnvolle Innovationen zu integrieren oder selbst neue Handelsmöglichkeiten durch Tokenisierung zu schaffen. Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, gibt es mit dezentralen Börsen und Self-Sovereign Identity bereits heute schon die Möglichkeit, diese zu integrieren und damit das ETS effizienter zu gestalten.

Ebenso bietet eine potenzielle Umstellung von einem Datenbank- auf ein Blockchain-basiertes System die Möglichkeit neue Ansätze, Assetklassen und Prozesse zu implementieren. Gerade die Entwicklung einer Art Template für den Blockchain-basierten Emissionshandel könnte von anderen Volkswirtschaften aufgegriffen werden. Durch ein hohes Maß an Interoperabilität, welches vor allem das “Inter Blockchain Communication” Protocol des Cosmos Netzwerks bietet, könnten eigenständige Emissionshandelssysteme entstehen, die miteinander interagieren können. Dies wäre ein mächtiges Werkzeug, um beispielsweise die globalen Vorhaben rund um das Pariser Klimaabkommen zu steuern.

Generell ist davon auszugehen, dass die Blockchain Technologie eine zunehmend größere Rolle beim Betreiben und Nutzen von Online-Diensten spielt. Dementsprechend kann schon frühzeitig eine Strategie entwickelt werden, wie ein Emissionshandelssystem aussehen könnte und welche Chancen und Risiken damit verbunden sind.

Glossar

Begriff	Beschreibung / Erläuterung
Algorithmische Stablecoins	Stablecoins, bei welchen die Kursstabilität nicht durch hinterlegte Sicherheiten, sondern durch automatische An- und Verkauf-Algorithmen gewährleistet wird.
AML	Anti-Money-Laundering; Prozesse, um Geldwäsche zu verhindern.
Anwendungsprogrammierschnittstelle (API)	(engl. Application Programming Interface) Eine Softwareschnittstelle, die den Zugang bzw. die Interaktion mit einem externen System ermöglicht.
Automated Market Maker (AMM)	Handelsplatz, wo keine traditionellen Orderbuch-Verfahren Anwendung finden, sondern durch Bonding-Curve Smart Contracts keine Gegenpartei für den Handel erforderlich ist. Voraussetzung ist aber ausreichende Liquidität für die jeweiligen Handelsgüter.
Backend	Bezeichnet die Ebene einer (Software-)Anwendung, die näher an Systemprozessen liegt und dem Benutzer verborgen bleibt. Abgrenzend hierzu: Frontend.
B2B	Business-to-Business (Verkäufe).
B2C	Business-to-Customer (Verkäufe).
Beta	Fertigungsstadium eines Informationssystems bzw. einer Software, welche zu Testzwecken veröffentlicht werden.
Bridges	Verbindungselement unterschiedlicher Blockchains bzw. Blockchain-Protokolle.
(Token) Burning	Bezeichnet den Vorgang, Token aus dem Umlauf zu bringen.
Continuous emissions monitoring system (CEMS)	(Dt. KEMS) Kontinuierliche Emissionsüberwachungssysteme dienen der automatischen, durchgängigen Überwachung und Aufzeichnung von Emissionen (z.B. Abgasen).
Chaincode	Bezeichnet Code (z.B. in Go oder Java), der von der Hyperledger-Blockchain unterstützt wird.
Clearing	Die Verrechnung von Zahlungsaufträgen.
Clearing-Stelle	Ein zum Clearing beauftragtes Institut.
Client-Server-System	Ein Netzwerkmodell, bei dem ein Client Dienste von einem Server anfordert.
Clients (Libra)	Netzwerkteilnehmer; Menschen, die Libra nutzen.
Collateral	Hinterlegte Sicherheiten, um den Wert einer Kryptowährung zu gewährleisten.
Contract Execution System	Der Großteil der Logik des Zahlungssystems sowie die Bedingungen, die eine Zahlung auslösen. Die beschriebenen Elemente werden mittels Smart Contracts auf einer DLT implementiert.

Begriff	Beschreibung / Erläuterung
Cosmos SDK	Cosmos Software-Development-Kit. Ein Open-Source-Framework zum Entwickeln von anwendungsspezifischen Blockchains für Programmierer.
Custody	Die Verwahrung von Kryptowerten. Custody-Provider bieten Finanzservices rund um das Halten, Transferieren und den Schutz von Kryptowerten an.
DAI	Eine synthetisch an den US-Dollar gekoppelte Stablecoin.
Decentralized Applications (DApps)	Eine Anwendung, welche Daten zur Repräsentation eines virtuellen Guts verwendet, die verteilt in einem Netzwerk, anstatt an einem zentralen Ort liegen.
DeFi	Decentralized-Finance (DeFi) beschreibt ein Blockchain-basiertes Ökosystem finanzieller Anwendungen, welche die zentral angelegten Funktionen des heutigen Finanzsektors in dezentraler Art und Weise widerspiegeln.
Dezentrale Börse	(Abk. DEX) bietet Nutzern direkte bzw. Peer-to-Peer Transaktionen durch Smart Contracts, sowie von Nutzern bereitgestellte Liquidität an, um Kryptowährungen zu tauschen. Im Vergleich dazu vollziehen Nutzer ihre Tauschgeschäfte auf zentralen Börsen nicht unbedingt mit anderen Nutzern, sondern primär mit der (zentralen) Plattform.
DLT	Distributed Ledger Technologie, funktioniert wie ein verteiltes Hauptbuch.
Disintermediation	Bedeutungsverlust oder der Wegfall von intermediären Geschäftsbereichen.
Docker-Container	Bezeichnet eine virtuelle Isolierung von Anwendungen mit dem Programm Docker.
Dezentrale Public Key Infrastruktur (DPKI)	Keine hierarchische Ableitung von Public Keys. Jeder Public Key kann ohne zentrale Instanz erzeugt werden.
Distributed Denial of Service (DDoS)	bezeichnet einen digitalen Angriff, bei dem mehrere Systeme ein Zielsystem zur Überlastung führen.
DvP	Delivery vs. Payment; Eine Begleichung, welche garantiert, dass eine Zahlung erst dann stattfindet, wenn die Gegenleistung erfüllt wurde.
ECAS	European Commission Authentication Service.
ECC	European Commodity Clearing AG.
EEX	European Energy Exchange.
emittieren	In Umlauf setzen.
EOA	Externally Owned Accounts.
Ethermint	Ethermint ist eine skalierbare und mit Ethereum interoperable PoS-Blockchain, welches mit dem Cosmos SDK gebaut wurde.
EUA	European Emission Allowances.

Begriff	Beschreibung / Erläuterung
EU-ETS	Europäisches Emissionshandelssystem.
Ethereum Virtual Machine (EVM)	Die EVM ist eine virtuelle Rechenmaschine, welches sich wie ein dezentraler Computer für Ethereum verhält. Die EVM führt Transaktionen und Smart Contract Code aus. Jede Ethereum-Node läuft auf der EVM, um Konsensus zu erreichen.
Framework	Rahmenwerk, dass Elemente für die Entwicklung bzw. den Betrieb von Informationssystemen zur Verfügung stellt.
Frontend	Bezeichnet die Ebene einer (Software-)Anwendung, die für die Präsentation (Benutzeroberfläche) und ggf. für die Interaktion mit dem Nutzer vorgesehen ist. Abgrenzend hierzu: Backend.
Gas	Bezeichnet die Einheit, welche den Rechenaufwand misst, um auf Ethereum bestimmte Operationen auszuführen und wird in Ether (die Kryptowährung der Ethereum-Blockchain) bezahlt.
Gateway	Eine Komponente, durch die zwischen zwei Systemen eine Verbindung entsteht.
Giralgeldtoken	Eine programmierbare Währung des privaten Bankensektors.
Golang (Go)	Bezeichnet eine Programmiersprache, die von Google entwickelt wurde.
Governance	Ein System zur Einflussnahme auf eine eigens kontrollierte Blockchain, z.B. um über Änderungen an technischen Fundamenten einer Blockchain zu entscheiden.
Inhaberinstrumente	Wertpapiere, welche Dividende oder Anleihenkupons an den Halter des physischen Wertpapieres ausschütten.
Inter-Blockchain Communication (IBC) Protokoll	Das Inter-Blockchain Communication Protokoll ist ein Open-Source Protokoll, um die Kommunikation zwischen unabhängigen DLT-Netzwerken zu ermöglichen. Durch die so geschaffene Interoperabilität können auch Wertetransfers vorgenommen werden. Dabei brauchen die Blockchains nicht direkt miteinander zu kommunizieren, sondern es reicht aus, wenn Informationspakete über bestimmte Kanäle mittels Smart Contracts verschickt werden, um eine Verbindung zu einer anderen Blockchain zu schaffen.
Intermediär	Eine Vermittlungsinstanz, vergleichbar mit einem Mittelman.
Java	Weit verbreitete objektorientierte Programmiersprache.
Jurisdiktion	Der Geltungsbereich für Rechtsprechung.
Kapitalschlüssel	Ein festgelegter Prozentsatz für alle EU-Mitgliederstaaten, nach welchem gehaftet werden muss. Die Berechnung basiert auf der Größe eines Mitgliedsstaates im Verhältnis zur Größe der EU ist.
KYC	Know-Your-Customer(-Prozesse).
Konsensmechanismus	Ein Mechanismus, der die Einigung der Teilnehmer erzielt, oft in Form eines Algorithmus.
Kontrahentenrisiko	Das Risiko, dass ein Vertragspartner ausfällt.

Begriff	Beschreibung / Erläuterung
Ledger	In diesem Kontext synonym zu öffentliche Blockchain.
Legacy-Systeme	Ältere IT-Systeme.
Leitzins	Der von der Zentralbank festgelegte Zinssatz, zu welchem Kreditinstitute Geschäfte tätigen.
Liquiditätsengpässe	Eine Situation, in welcher finanzielle Mittel fehlen, um Zahlungsverpflichtungen nachzukommen.
Lock-in-Effekte	Effekte, die den Wechseln zu anderen Systemen/Produkten für Konsumenten erschweren.
Mainnet	Mainnet beschreibt ein vollständig entwickeltes und der Öffentlichkeit bereitgestelltes Blockchain-Protokoll. Über das Mainnet werden Transaktionen versendet, verifiziert und auf einer Blockchain gespeichert.
Marktkapitalisierung	Der rechnerische Gesamtwert eines Unternehmens.
MiCA	Markets-in-Crypto-Assets; Ein von der EU veröffentlichter Vorschlag zur Regulierung von Kryptowerten.
Miner	Bzw. Crypto Miner bezeichnen Personen oder Maschinen, die als Netzwerkteilnehmer einer Blockchain mit einem gewissen Rechenaufwand Transaktionen validieren, und dafür in der jeweiligen Kryptowährung belohnt werden. Mit Rechenaufwand ist beim Mining die Leistung im Sinne des Proof-of-Work Konsensmechanismus gemeint.
MoSCoW	Abkürzung für <i>must have, should have, won't have</i> , um Vorhaben entsprechend ihrer Priorität zu sortieren.
Multi-Currency-Stablecoin	Ein Stablecoin, der durch mehrere Währungen gedeckt ist.
Multisignature (Multisig) Smart Contract	Multisignatur (Multisig) Smart Contracts ermöglichen es mehreren Unterzeichnern, eine Aktion in der Blockchain zu überprüfen und Zustimmung zu äußern, bevor die Aktion ausgeführt wird.
Native Währung	Eine (Krypto-)Währung, die originär ihrer zugrundeliegenden Blockchain entstammt. Im Gegensatz dazu können auf der Grundlage einer Blockchain und in Abgrenzung zu ihrer nativen Währung mittels Smart Contracts andere Kryptowährungen abgeleitet werden, deren Transaktionen wiederum durch dieselbe Blockchain verarbeitet werden müssen.
NFT	Non-Fungible Token. Ein eindeutig zu einem digitalen Objekt zugeordneter Token.
Node	Ein Netzwerkknoten, welcher Transaktionen innerhalb einer Blockchain validiert.
Node-Operator	Der Betreiber eines Netzwerkknotens (Node) einer Blockchain.
Off-Chain Collateralized Stablecoins	Stablecoins, die durch traditionelle Sicherheiten gedeckt werden. Collateralized Stablecoins folgen einem den Tokenized Funds ähnlichen Konzept. Der Preis eines Collateralized Stablecoins wird durch einen zugrundeliegenden Vermögenswert oder einen Korb mehrerer Vermögenswerte bestimmt.
On-Chain Collateralized Stablecoins	Stablecoins, die durch digitale Vermögenswerte, beispielsweise Bitcoin, gedeckt werden. Collateralized Stablecoins folgen einem den Tokenized

Begriff	Beschreibung / Erläuterung
	Funds ähnlichen Konzept. Der Preis eines Collateralized Stablecoins wird durch einen zugrundeliegenden Vermögenswert oder einen Korb mehrerer Vermögenswerte bestimmt.
Onboarding	Die Aufnahme und Integration von neuen Mitgliedern in ein System.
Only-Once-Principle (OOP)	bezeichnet den Anspruch, wonach Bürger gegenüber staatlichen Einrichtungen bestimmte Informationen nur einmal mitteilen müssen, um sie dann für weitere Prozesse wiederzuverwerten zu können
Oracle	Eine Entität, welche Blockchain-Netzwerke mit externen Systemen verbindet, sodass Smart Contracts mittels externen Inputs ausgeführt werden können.
Pay-per-Use	Bezahlung basierend auf der Nutzung. Beispielsweise können Maschinen nach produzierter Einheit oder genutzter Zeiteinheit abgerechnet werden.
Peer-to-Peer (P2P)	Peer-to-Peer beschreibt eine verteilte Anwendungsarchitektur, in welchen die Netzwerkteilnehmer (Nodes bzw. Peers) untereinander direkt verbunden und gleichrangig sind.
Proof-of-Authority (PoA)	Konsensmechanismus einer Blockchain, bei dem die Netzwerkteilnehmer aufgrund ihrer (vertrauensvollen) Identität Transaktionen validieren können.
Proof-of-Stake (PoS)	Konsensmechanismus einer Blockchain, bei dem Netzwerkteilnehmer durch eine gewichtete zufällige Auswahl für die Validierung von Transaktionen ausgewählt werden. Der Anspruch zur Validierung bzw. die Gewichtung eines Validators bzw. erfolgt durch zugewiesenes (Krypto-)Vermögen.
Proof-of-Work (PoW)	Konsensmechanismus einer Blockchain, bei dem für die Validierung von Transaktionen ein Arbeitsbeweis von einem Netzwerkteilnehmer erbracht werden muss. Dafür führen alle Netzwerkteilnehmer Berechnungen für einen richtigen Hashwert durch. Derjenige Netzwerkteilnehmer, der als erstes die Lösung erbracht hat, darf als einziger die offenstehenden Transaktionen validieren.
Protokoll	Beschreibt einen Standard, nach welchem innerhalb eines Netzwerks kommuniziert wird, also z.B. wie Transaktionen dezentral zwischen Parteien zu erfolgen haben.
Pseudonym	Unter einem fiktiven Namen agieren. Eine Form der Anonymität.
Realsektor	Der volkswirtschaftliche Sektor verantwortlich für die Herstellung von Gütern.
Resilienz	Widerstandsfähigkeit.
Sanktionsresilienz	Widerstandsfähigkeit gegenüber Sanktionen.
SDK	Software-Development-Kit.
Second-Layer Application (L2)	Sekundäres Framework, welches auf einem existierenden Blockchain-Netzwerk errichtet wird, um die Skalierbarkeits- und Durchsatzprobleme der großen Kryptowährungsnetzwerke zu lösen.

Begriff	Beschreibung / Erläuterung
Settlement	Der Prozess in welchem der Käufer den vereinbarten Betrag bezahlt und die Gegenleistung erhält.
Single-Currency-Stablecoins	Stablecoins, die durch eine einzelne Währung gedeckt sind.
Single-Point-of-Failure	Der Ausfall eines Elements führt zum Ausfall des gesamten Systems.
Smart Contracts	Selbstausführende Verträge basierend auf vordefinierten Bedingungen.
SPV	Eine Zweckgesellschaft, welche eine von der Bank losgelöste, eigenständige rechtliche Entität darstellt, auf welche Vermögenswerte übertragen werden können und die einem festgeschriebenen Zweck dient.
SSI	Self-Sovereign Identity.
SWIFT-System	„Society for Worldwide Interbank Financial Telecommunication“; Ein Kommunikationsnetzwerk für Banken.
Sybil-Attacke	Bezeichnet einen Angriff auf ein Peer-to-Peer Netzwerk (in Abgrenzung zu Client-Server-Netzwerk) durch Erstellen falscher Identitäten, um z.B. Mehrheitsentscheidungen zu beeinflussen oder die Kommunikation im Netzwerk zu stören.
Systembrüche	Fehler bei der Übertragung zwischen unterschiedlichen Systemen.
SZR	Die Sonderziehungsrechte des Internationalen Währungsfonds, um eine Wertstabilität zu gewährleisten.
Taxonomie	Einordnung in ein bestimmtes System.
Tendermint	1. Der Byzantinische-Fehler-tolerante Konsensalgorithmus, der Cosmos als Tendermint Core zugrunde liegt; 2. Die Tendermint Inc. hat als Unternehmen den Grundstein für Cosmos gelegt.
Tokenisierung	Die Darstellung von Rechten und Vermögenswerten in Form von Token.
Tokenized Funds	Abbildung von Vermögenswerten in Form von Tokens auf einer Blockchain-basierten Lösung.
Transaktion	Im Rahmen einer Blockchain bezeichnen Transaktionen Vorgänge, die jeweils von den Netzwerkteilnehmern verifiziert werden müssen, um in der Blockchain protokolliert zu werden.
Transaktionskosten	Damit Netzwerkteilnehmer anfallende Transaktionen bestätigen, um sie letztlich in die Blockchain aufzunehmen, ist eine Transaktionsgebühr an die Netzwerkteilnehmer zu entrichten.
UBA	Umweltbundesamt.
Validator	Entität, welche Transaktionen auf einer Blockchain verifiziert.
Währungskorb	Eine gewichtete Zusammenfassung von unterschiedlichen Währungen.
Wallets	Eine „Kryptowährungsbrieftasche“; Ein System zur Aufbewahrung von Kryptowerten.
Zentralbankwährung	Die von einer Zentralbank emittierte Währung. Beispielsweise der Euro.

Quellenverzeichnis

- Air Carbon Exchange. 2022.** Air Carbon. *A digital exchange focused on eliminating market friction in a carbon constrained economy.* [En ligne] 2022. <https://www.aircarbon.co/>.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). 2021.** Studie: Neue Blockchain-Methoden sind umweltfreundlicher als ihr Ruf. [En ligne] 2021. <https://www.bmu.de/pressemitteilung/studie-neue-blockchain-methoden-sind-umweltfreundlicher-als-ihr-ruf>.
- Cosmos. 2021.** The Internet of Blockchains. *Cosmos.Network.* [En ligne] 2021. [Citation : 05 10 2021.] <https://cosmos.network/>.
- Deutsche Emissionshandelsstelle. 2021a.** *Einführung Emissionshandel.* 2021a.
- **2015.** *Emissionshandel in Zahlen.* Berlin : DEHST, 2015.
- **2021b.** *Leitfaden zum Anwendungsbereich sowie zur Überwachung und Berichterstattung von CO2-Emissionen -- Nationales Emissionshandelssystem 2021 und 2022.* 2021b.
- **2020a.** *Nationales Emissionshandelssystem - Hintergrundpapier.* 2020a.
- **2013.** www.dehst.de. [En ligne] 2013. [Citation : 17 02 2022.] https://www.dehst.de/DE/Europaeischer-Emissionshandel/Pruefstellen/pruefstellen_node.html.
- **2019.** www.dehst.de. [En ligne] 2019. [Citation : 17 02 2022.] https://www.dehst.de/DE/Europaeischer-Emissionshandel/EU-Emissionshandel-verstehen/Umsetzung-Ausgestaltung/umsetzung-ausgestaltung_node.html.
- **2021c.** www.dehst.de. [En ligne] 2021c. [Citation : 18 01 2022.] https://www.dehst.de/DE/Europaeischer-Emissionshandel/Unionsregister/Konto/konto_node.html.
- **2018a.** www.dehst.de. [En ligne] 2018a. [Citation : 17 02 2022.] https://www.dehst.de/DE/Europaeischer-Emissionshandel/Luftfahrzeugbetreiber/Emissionshandel/Teilnehmer/teilnehmer_node.html.
- **2018b.** www.dehst.de. [En ligne] 2018b. [Citation : 17 02 2022.] https://www.dehst.de/DE/Europaeischer-Emissionshandel/EU-Emissionshandel-verstehen/Umsetzung-Ausgestaltung/umsetzung-ausgestaltung_node.html.
- **2020b.** www.dehst.de. [En ligne] 2020b. [Citation : 14 01 2022.] https://www.dehst.de/DE/Europaeischer-Emissionshandel/Unionsregister/Registerarchitektur/registerarchitektur_node.html.
- Diedrich, H. 2016.** *Ethereum - blockchains, digital assets, smart contracts, decentralized autonomous organizations.* s.l. : Wildfire Publishing, 2016.
- Eberhardt, J. et Tai, S. 2017.** On or Off the Blockchain? Insights on Off-Chaining Computation and Data. *European Conference on Service-Oriented and Cloud Computing.* 2017, pp. 3-15.
- Energy Web Foundation. 2022.** Energy Web Decentralized Operating System (EW-DOS). [En ligne] 2022. <https://energy-web-foundation.gitbook.io/energy-web/>.
- EU-Kommission. 2021a.** [En ligne] 2021a. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_21_2663.

- , **2022**. EBSI. [En ligne] 2022.
<https://ec.europa.eu/cefdigital/wiki/display/CEFDIGITAL/EBSI>.
- , **2021b**. eIDAS Regulation. [En ligne] 2021b. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/eidas-regulation>.
- , **2015**. *EU ETS Handbook*. 2015.
- European Commodity Clearing. 2022**. European Commodity Clearing. *Physical Settlement*. [En ligne] 2022. [Citation : 17 02 2022.] <https://www.ecc.de/en/operations/physical-settlement>.
- European Energy Exchange AG. 2021**. EEX. *EU ETS Auctions*. [En ligne] 2021. [Citation : 17 02 2022.] <https://www.eex.com/en/markets/environmental-markets/eu-ets-auctions>.
- , **2022**. EEX. *EU ETS Auktionen*. [En ligne] 2022. [Citation : 17 02 2022.] <https://www.eex.com/de/maerkte/umweltprodukte/eu-ets-auktionen>.
- Finck, M. 2019**. *Blockchain Regulation and Governance in Europe*. s.l. : Cambridge University Press, 2019.
- Fu, B., Shu, Z. et Liu, X. 2018**. Blockchain Enhanced Emission Trading Framework in Fashion Apparel Manufacturing Industry. 2018.
- Höfelmann, D. et Sandner, P. 2019**. Medium.com. *Entscheidungshilfe für den Einsatz von Blockchain-Technologien in Unternehmen: Vier Frameworks im Vergleich*. [En ligne] 2019. [Citation : 3 Mai 2020.] <https://philippsandner.medium.com/entscheidungshilfe-f%C3%BCr-den-einsatz-von-blockchain-technologien-in-unternehmen-vier-frameworks-im-fa7b5a9a0bc5>.
- Hyperledger Fabric. 2021**. Hyperledger Fabric. [En ligne] 2021. [Citation : 28 04 2021.] <https://www.hyperledger.org/use/fabric>.
- IDunion. 2022**. Ein offenes Ökosystem für vertrauensvolle Identitäten. [En ligne] 2022. <https://idunion.org/>.
- Kim, S.-K. et Huh, J.-H. 2020**. Blockchain of Carbon Trading for UN Sustainable Development Goals. 2020.
- Kobiela, G., Lauten-Weiss, J. et Ramesohl, S. 2021**. Blockchains nachhaltig gestalten: Vorschlag von nachhaltigkeitsorientierten Entscheidungskriterien und eines Verfahrenskonzepts für die Umsetzung staatlich geförderter oder initiiertes Projekte im Bereich Blockchain. *Wuppertal Report*. 2021, Vol. 21.
- Koens, T. et Poll, E. 2020**. Assessing Interoperability Solutions for Distributed Ledgers. [En ligne] 2020. [Citation : 26 April 2020.] <https://www.ingwb.com/media/2667864/assessing-interoperability-solutions-for-distributed-ledgers.pdf>.
- Liss, F. 2018**. An architecture and a prototype of a decentralized emission trading system based on smart contracts. 2018.
- MetaMask. 2022**. A crypto wallet & gateway to blockchain apps. [En ligne] 2022. [Citation : 10 Januar 2022.] <https://metamask.io/>.
- Pan, Y., et al. 2019**. Application of Blockchain in Carbon Trading. 2019.
- R3. 2021**. Build multi-party solutions for a digital-first world. [En ligne] 2021. [Citation : 28 04 2021.] <https://www.r3.com/corda-platform/>.
- Richardson, . et Xu, J. 2020**. Carbon Trading with Blockchain. 2020.

Schletz, M., Franke, L. et Salomo, S. 2020. Blockchain Application for the Paris Agreement Carbon Market Mechanism—A Decision Framework and Architecture. 2020.

Voshmgir, S. 2020. *Token Economy - How the Web3 reinvents the internet.* Berlin : Token Kitchen, 2020.

Zimmermann, Hendrik et Hoppe, Janna. 2018. *Chancen und Risiken der Blockchain für die Energiewende.* 2018.