Sachbericht zum Verwendungsnachweis – Schlussbericht gemäß Nr. 8.2 NKBF 98

Zuwendungsempfänger:

51nodes GmbH

Förderkennzeichen:

19S22002P

Vorhabenbezeichnung:

Verbundvorhaben GAIA-X 4 moveID - Dezentrale digitale Fahrzeugidentitäten in der hochvernetzten Verkehrsumgebung

Ein Projekt der GAIA-X *4* Future Mobility Projektfamilie

Teilvorhaben: „SSI-Konzeption im Kontext von dezentraler Mobilitätsinfrastruktur und Interoperabilitätsansätzen mit Architektur und Pilotimplementierung“

Laufzeit des Vorhabens und Berichtszeitraum:

01.07.2022 – 30.09.2025

Erstellt am:

16.12.2025

Finanziert von der Europäischen Union
NextGenerationEU

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Teilprojektleitung
51nodes GmbH
Dr. Achim Klein
Industriestr. 4
70565 Stuttgart

Autoren
Dr. Achim Klein
Jochen Kaßberger

Fördernde Institution
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE)
Vormals: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)
53107 Bonn

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE, ehemals BMWK) unter dem Förderkennzeichen 19S22002P gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Der Bericht wird vorgelegt
TÜV Rheinland Forschungs- und Innovationsmanagement GmbH
Frau Marie-Pauline Schelper, Herr Okan Keskin
Am Grauen Stein
51105 Köln

Schlagwörter
Gaia-X, moveID, SSI, digitale Identitäten, Mobilitätssektor, Techno-ökonomisches Rahmenwerk, Smart City

Kurzfassung
Der Schlussbericht von 51nodes zum Projekt Gaia-X 4 moveID dokumentiert den gesamten Projektverlauf, beginnend mit den technischen und wissenschaftlichen Voraussetzungen zum Projektstart Mitte 2022. Im Fokus stehen weiterhin die im Teilprojekt 2 durchgeführten Arbeiten zum Entwurf einer digitalen Identitätsinfrastruktur für den Mobilitätsbereich sowie die Zusammenarbeit mit relevanten SSI-Initiativen und Schwesterprojekten. Als zentrale technische Ergebnisse werden die Veröffentlichung eines Open-Source SSI-Frameworks und diverse Fachartikel zur SSI-basierten Vision der moveID-Plattform, zum Standardprozess für Mobilitätdienste auf der moveID-Plattform und die Systemarchitektur dargestellt, womit gleichzeitig die Grundlage für die geplante weitere Verwertung gelegt wurde.
.

Inhaltsverzeichnis

1 Kurze Darstellung 7

1.1 Aufgabenstellung ... 7

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde ... 9

1.2.1 Die Vision von Gaia-X 9

1.2.2 Gaia-X 4 Future Mobility 9

1.2.3 Die Rolle von 51nodes: Expertise, Führung im TP2 und Allianzen 10

1.2.4 Das regulatorische und rechtliche Umfeld (Mitte 2022) 11

1.2.5 Wichtige technische Entwicklungsparadigmen der Automobilität 12

1.2.6 Angrenzende Datenraum-Ökosysteme 12

1.2.7 Zusammenfassung 13

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens ... 14

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 15

1.4.1 Das Konzept der Self-Sovereign Identity (SSI) 15

1.4.2 Das Architekturmodell von Trust over IP 16

1.4.3 W3C-Standards als Eckpfeiler 17

1.4.4 Verifiable Data Registries für SSI-Netzwerke 18

1.4.5 SSI-Software Development Kits 19

1.4.6 DID-Methoden 20

1.4.7 Kommunikationsprotokolle: DIDComm vs. OpenID Connect 21

1.4.8 Das Gaia-X Trust-Framework 21

1.4.9 eIDAS 2.0 und die EUDI-Wallet 22

1.4.10 Verwendungshürden von SSI 23

1.4.11 Zusammenfassende Bewertung der Voraussetzungen für die Schaffung einer digitalen Identitätsinfrastruktur 23

1.4.12 Technologische Schlussfolgerungen 24

1.4.13 Relevante Fachliteratur und Spezifikationen 27

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen ... 28

1.5.1 SSI-Initiativen 28

1.5.2 Zusammenarbeit mit MOBI 29

1.5.3 Zusammenarbeit mit Gaia-X 4 AGEDA 29

1.5.4 Zusammenarbeit mit Gaia-X 4 AMS 30

1.6 Literatur ... 30

2 Eingehende Darstellung 33

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele ... 33

2.1.1 Teilprojekt 2: Infrastruktur Ökosystem / Nachweis Dezentralität & Austauschbarkeit 33

2.1.2 Teilprojekt 3 (TP3): Data Sharing im Daten- und Dienst-Ökosystem 66

2.1.3 Teilprojekt 4 (TP4): Vehicle2X Services in heterogenen, dezentralen Mobilitätsinfrastrukturen 66

2.1.4 Teilprojekt 6 (TP6): Austausch innerhalb der Projektfamilie GAIA-X Future Mobility, Zusammenarbeit mit weiteren Initiativen / Projekten und Projektmanagement 67

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 68

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 68

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 69

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen, der während der Durchführung dem Zuwendungsempfänger bekannt wurde 69

2.5.1 Ausrichtung an W3C- und OpenID-Standards 69

2.5.2 Synergie mit der European Digital Identity (EUDI) Wallet 70

2.5.3 Vergleichende Analyse mit Brancheninitiativen 70

2.6 Veröffentlichungen 71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zielbild von Gaia-X 4 moveID: In der Smart-City der Zukunft stehen Verkehrsteilnehmer, Infrastruktur und dezentral organisierte Dienste im transaktionalen Austausch auf SSI-Basis (Autoren: Jochen Kaßberger und das moveID-Konsortium) 7

Abbildung 2: ToIP Architekturmodell (Quelle: https://www.trustoverip.org/toip-model/, abgerufen 2025-12-16) 17

Abbildung 3: Rollen und Bestandteile bei Selbstsouveränen digitalen Identitäten (Quelle: https://www.w3.org/TR/vc-data-model-1.0/, abgerufen 2025-12-16) 18

Abbildung 4: SSI-Interoperatbilitätsmodell (Autor: Dr. Detlef Hühnlein, ecsec GmbH, aufbauend auf einer Darstellung von Longley et al. in https://www.w3.org/TR/vc-data-model-1.1/) zeigt 3 wesentliche Dimensionen der Interoperabilität: (1) DID-Methoden, (2) Das Verifiable Credential Data Model und (3) Die Protokolle zum Ausstellen und Präsentieren von Verifiable Credentials 39

Abbildung 6: Um das wirtschaftliche Potenzial der moveID-Plattform darzustellen, haben wir Geschäftsmodell für alle Ebenen und Anreize für alle Rollen konzipiert (Autoren: Jochen Kaßberger und Dr. Achim Klein, 51nodes) 43

Abbildung 7: Geschäftsmodellentwurf für den moveID-Anwendungsfall „Smart Parking“ (Autoren: moveID-Konsortium) 44

Abbildung 8: Die Gaia-X 4 moveID Systemarchitektur in der aktualisierten Fassung von 2025 besteht aus drei Schichten und zeigt wesentliche Komponenten in allen Bereichen (Autoren: Jan-Paul Buchwald, 51nodes und das moveID-Konsortium) 46

Abbildung 9: Der Mobile Commerce Process zeigt die wesentlichen Rollen, IT-Systeme und Prozessschritte im avisierten moveID-Ökosystem für digitale Mobilitätsdienste (Autoren: 51nodes und Partner von moveID) 49

Abbildung 10: Öffentliche Demonstration des "Parken und Laden" Demonstrators in München mit SSI-basiertem Zugang zum Ladepunkt von 51nodes (Fotos: moveID-Konsortium, 2023) 56

Abbildung 11: 51nodes trug die SSI-Infrastruktur für die Autorisierung von Park- und Ladevorgängen in der Architektur des IAA 2023-Demonstrators bei (Autoren: moveID Konsortium) 57

Abbildung 12: Jochen Kaßberger, Geschäftsführer von 51nodes, bei der IAA 2023 Demonstration von moveID (Foto: Achim Klein) 58

Abbildung 13: SSI-basierter Autorisierungsablauf mit dem Mobility SSI Framework von 51nodes (Autor: Julian Voelkel, 51nodes) 59

Abbildung 14: Geschätzter Gesamtmarkt (TAM) in der EU für Gaia-X 4 moveID-Anwendungsfälle in Mrd. Eur in den Jahren 2025, 2030, 2035 und 2040 mit jährlicher Wachstumsrate (CAGR) (Autoren: Vincent Geilenberg, Achim Klein, das moveID-Konsortium) 63

Abbildung 15: Bei einer angenommenen Servicegebühr der moveID-Plattform von 5% und den geschätzten Umsätzen der moveID-Anwendungsfälle auf der Plattform könnte im Jahr 2040 der Umsatz aus den 4 Fällen auf 570 Mio. EUR wachsen (Autoren: Vincent Geilenberg, Achim Klein, das moveID-Konsortium) 65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwandte Datenrauminitiativen (Autoren: moveID-Konsortium).....13

Tabelle 2: Übersicht der Schlüsseltechnologien, Reifegrad (TRL) nach Einschätzung des moveID-Konsortiums und Herausforderungen für moveID (Stand 2022) 26

Tabelle 3: Erkenntnisse aus dem Austausch mit SSI-Initiativen mit Stand zum jeweils angegebenen Zeitpunkt (Autoren: Achim Klein und das moveID-Konsortium) 29

Tabelle 4: Analyse von SSI-Frameworks (Autor: Julian Voelkel, 51nodes; Stand 2025-09).....36

Tabelle 5: SSI-Demonstratoren von angrenzenden Gaia-X-Projekten (Autor: Julian Voelkel, 51nodes).....37

Tabelle 6: Vergleich der SSI-Stacks für Mobilitätsdienste aus dem moveID-Projekt (Autor: Julian Voelkel, 51nodes; Stand 2025-09).....62

Tabelle 7: Schätzung der Marktgröße in der EU für die moveID-Anwendungsfälle (Autoren: Vincent Geilenberg, Achim Klein, das moveID-Konsortium).....64

Tabelle 8: Vergleich moveID mit MOBI (Autoren: das moveID-Konsortium) 71

Tabelle 9: Veröffentlichungen von 51nodes im Rahmen des Projekts Gaia-X 4 moveID (Autor der Tabelle: Achim Klein).....72

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das Projekt Gaia-X 4 moveID zielte darauf ab, die Grundlagen für ein dezentrales Daten- und Service-Ökosystem für die Mobilität der Zukunft zu schaffen. Als Kurzform für den Projektnamen wird unten auch „moveID“ verwendet.

Das Projekt Gaia-X 4 moveID war Teil der **Gaia-X 4 Future Mobility Projektfamilie**, die in der Mobilitätsdomäne des deutschen Gaia-X Hubs angesiedelt war. Diese Familie bestand aus mehreren Konsortien, deren gemeinsamer Fokus auf der anwendungsnahen Entwicklung zukünftiger Mobilitätsanwendungen lag, bei denen die datenbasierte Vernetzung zwischen Herstellern, Zulieferern, Dienstleistern und Nutzern entscheidend war. Um Doppelarbeit zu vermeiden und Synergien zu nutzen, wurde innerhalb der Projektfamilie ein kontinuierlicher Austausch gepflegt.

Im Kern des Vorhabens Gaia-X 4 moveID und vor allem im Beitragsfokus von 51nodes stand die prototypische Entwicklung und Erprobung von **dezentralen digitalen Identitäten** auf Basis von **Self-Sovereign Identities (SSI)**. Diese Technologie sollte eine sichere, souveräne und anbieterübergreifende Kommunikation zwischen Fahrzeugen, intelligenter Verkehrsinfrastruktur und verschiedenen datenbasierten Mobilitätsdienstanbietern ermöglichen.

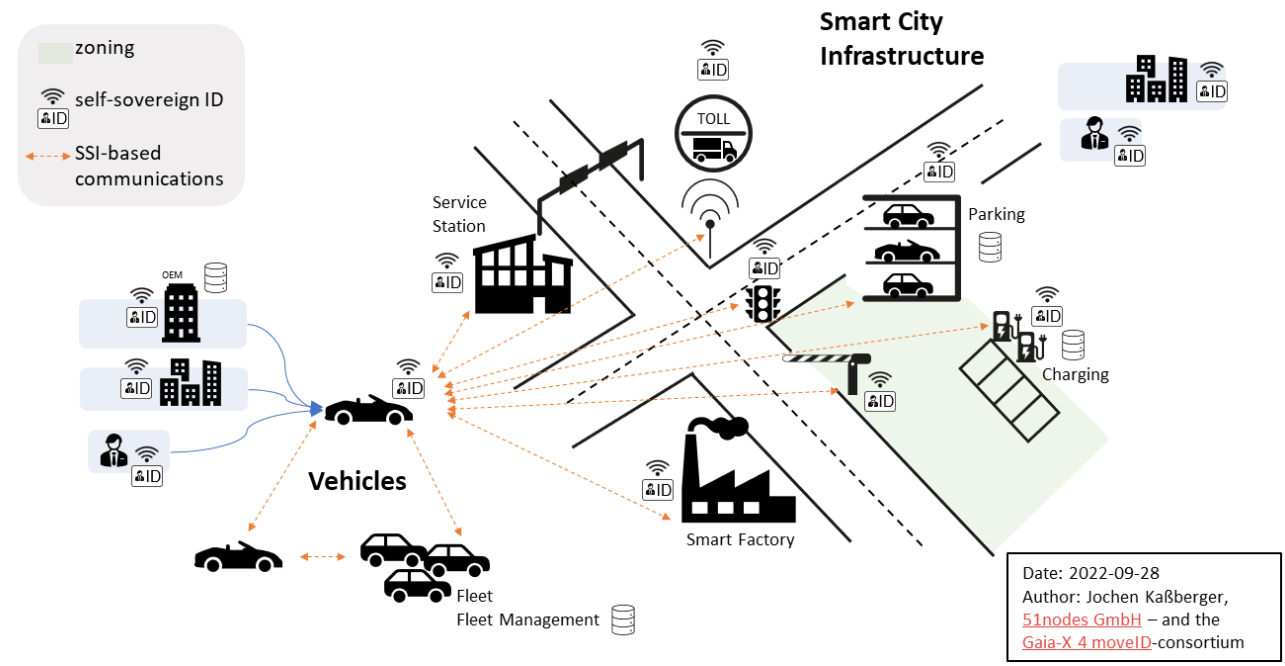


Abbildung 1: Zielbild von Gaia-X 4 moveID: In der Smart-City der Zukunft stehen Verkehrsteilnehmer, Infrastruktur und dezentral organisierte Dienste im transaktionalen Austausch auf SSI-Basis (Autoren: Jochen Kaßberger und das moveID-Konsortium)

Für 51nodes, als Spezialist für SSI, Blockchain-Technologie und dezentrale Netzwerke, lag der Fokus auf der Schaffung der technologischen Grundlagen für dieses Ökosystem. Ein zentrales Ziel war es, die Verschlossenheit und mangelnde Interoperabilität bestehender, meist zentralistischer Infrastruktursysteme zu überwinden. Das übergeordnete Vorhaben, ein offenes, auf europäischen Werten basierendes Ökosystem zu etablieren, deckte sich mit dem Anspruch von 51nodes, Unternehmen bei der Realisierung von dezentralen Projekten zu unterstützen.

Das Teilprojekt 2 (TP2), "Infrastruktur Ökosystem / Nachweis Dezentralität & Austauschbarkeit", bildete den technologischen Kern des Vorhabens und stand im Zentrum der Aktivitäten von 51nodes.

Die **wissenschaftlich-technischen Ziele** für 51nodes im TP2 umfassten:

- **Technologiesichtung und -bewertung:** 51nodes übernahm die Leitung des Arbeitspakets 2.1 (AP 2.1) und war damit verantwortlich für die Analyse und Bewertung unterschiedlicher Technologien, insbesondere SSI-Konzepte und Blockchain-Ansätze, auf ihre Eignung für das Mobilitäts-Ökosystem. Hierzu gehörte die Untersuchung prototypischer Implementierungen und die Recherche von Best-Practices.
- **Architekturentwicklung:** Ein zentrales Ziel war die Mitwirkung an der Entwicklung der technischen Systemarchitektur (AP 2.3). 51nodes brachte hier seine Expertise ein, um die Integration von SSI-Technologien abzustimmen und ein technisch-ökonomisches Zielszenario zu erarbeiten (siehe Abbildung 1). Ziel war es, eine Architektur zu schaffen, die eine hersteller- und technologieunabhängige Infrastruktur anstrebt.
- **Pilotimplementierung:** 51nodes war maßgeblich an der Konzeption und dem Aufbau der Entwicklungsumgebung sowie an der Verprobung der SSI-Implementierung mit Testpartnern und realen Fahrzeugen beteiligt (AP 2.4). Ziel war der technische Nachweis, dass SSI-basierte, dezentral organisierte Mobilitätsdienste realisierbar sind und potenziell skalierbar aufgezogen werden können.

Die **wirtschaftlichen Ziele** für 51nodes lagen in:

- **Schaffung von Standards und Interoperabilität:** Durch die Arbeit an den Schnittstellen (AP 2.2) und der Systemarchitektur sollte eine Grundlage für interoperable Lösungen geschaffen werden, die den Lock-in-Effekten zentralisierter Plattformen entgegenwirken.
- **Erschließung neuer Geschäftsfelder:** Das Projekt sollte die techno-ökonomische Machbarkeit der entwickelten Systemarchitektur überprüfen. Für 51nodes bedeutete dies die Vorbereitung einer möglichen Verwertung der Projektergebnisse nach Projektende und perspektivisch damit verbunden, der Erschließung neuer Geschäftsfelder.
- **Stärkung des Ökosystems:** Als aktives Mitglied in verschiedenen Technologie-Gruppen war es für 51nodes ein Ziel, durch die Koordination von Interoperabilitäts- und SSI-Themen die Vernetzung zu stärken und das Ökosystem für dezentrale Technologien in Deutschland und Europa voranzubringen.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Dieser Abschnitt beschreibt die gegebenen Voraussetzungen und Rahmenbedingungen, die den Start des Projekts „Gaia-X 4 moveID“ am 1. Juli 2022 aus der Perspektive der 51nodes GmbH prägten. Der Projektstart war bestimmt von der europäischen Strategie zur digitalen Souveränität, den Vorgaben des Förderprogramms „Gaia-X 4 Future Mobility“ und einem komplexen Geflecht aus rechtlichen, technologischen und ökosystemischen Abhängigkeiten.

1.2.1 Die Vision von Gaia-X

Das Projekt Gaia-X 4 moveID ist Teil einer umfassenden europäischen Strategie zur Erlangung digitaler Souveränität. Diese Einbettung definierte die grundlegenden Anforderungen und die technologische Ausrichtung des Vorhabens.

Gaia-X[1] wurde als paneuropäische Initiative ins Leben gerufen, um eine Dateninfrastruktur zu schaffen, die auf Werten wie digitaler Souveränität, Vertrauen und Interoperabilität basiert. Das Ziel war ein föderiertes System, das bestehende Infrastrukturen über offene Standards verbindet, um die Abhängigkeit von außereuropäischen Hyperscalern zu reduzieren [Ehrlich et al., 2021]. Diese politische Vision wurde für Technologiepartner wie 51nodes zur technischen Anforderung, bei der Dezentralisierung und Datenportabilität gefordert sind.

1.2.2 Gaia-X 4 Future Mobility

Gaia-X 4 moveID war Teil der Projektfamilie „Gaia-X 4 Future Mobility“[2], die die Digitalisierung im deutschen Mobilitätssektor vorantreiben soll [Heinbach et al., 2022].

Die Projektfamilie Gaia-X 4 Future Mobility, ein zentraler Bestandteil der Domäne Mobilität des Gaia-X Hub Germany, widmete sich der Realisierung zukünftiger Mobilitätsanwendungen auf Basis der Gaia-X-Architektur. Sie umfasste sechs vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderte Projekte, die sich auf die datenbasierte Vernetzung von Herstellern, Zulieferern, Dienstleistern und Nutzern konzentrierten.

Die Koordination der Projektfamilie lag bei dem Institut für KI-Sicherheit des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR).

Die Projekte innerhalb der Familie deckten ein breites Spektrum an Zukunftsthemen der Mobilität ab:

- **Datenversorgung für autonomes Fahren:** Ein Schwerpunkt lag auf der Bereitstellung von Daten für automatisierte Fahrzeuge und dem Aufbau kooperativer Systemverbünde. Hierbei ging es um die Entwicklung einer sicheren und souveränen Dateninfrastruktur.
- **Remote-Operation:** Die Projekte erforschten und entwickelten Lösungen für die Fernsteuerung (Remote-Operation) von automatisierten Fahrzeugen und ganzen Fahrzeugflotten.

[1] https://gaia-x.eu/

[2] https://www.gaia-x4futuremobility.de/

- **Digitale Identitäten:** Ein weiterer wichtiger Aspekt war die Schaffung von sicheren und dezentralen digitalen Identitäten für Fahrzeuge und Nutzer im Straßenverkehr.
- **Product-Life-Cycle und Digital Twin:** Die Projekte befassten sich mit dem gesamten Produktlebenszyklus (Product-Life-Cycle) und dem Konzept des digitalen Zwillings (Digital Twin) im Kontext des automatisierten Fahrens.

Die einzelnen Projekte im Überblick

- **GAIA-X 4 KI:** Dieses Projekt lieferte anwendungsbezogene Beiträge zur Entwicklung von Gaia-X, indem es Anwendungsfälle (Use Cases) im Bereich des automatisierten und vernetzten Fahrens sowie in der industriellen Fertigung untersuchte.
- **GAIA-X 4 AMS:** Der Fokus dieses Projekts lag auf der Bereitstellung von Daten und Dienstleistungen für das automatisierte Fahren und kooperative Systemverbünde. Die Grundlage hierfür bildeten vernetzte und automatisierte Fahrzeuge sowie intelligente Verkehrsinfrastrukturen.
- **GAIA-X 4 ROMS:** Ziel war die Entwicklung von Technologiebausteinen für fahrzeugbasierte Transportkonzepte für Personen und Güter. Dies sollte ein zentrales und dezentrales Management großer Fahrzeugflotten ermöglichen.
- **GAIA-X 4 PLC-AAD:** Dieses Projekt befasste sich mit der Entwicklung und dem Aufbau eines übergreifenden "Open Distributed Data Ecosystem". Dieses Ökosystem sollte die Produktentwicklung, die Fertigung und den After-Sales-Bereich unterstützen.
- **GAIA-X 4 moveID:** Das Projekt das in diesem Bericht betrachtet wird. Im Mittelpunkt stand die technologische Umsetzung von dezentralen, digitalen Identitäten im Straßenverkehr. Es sollte ein diskriminierungsfreier Zugang zu digitalen Services in einer vernetzten europäischen Infrastruktur vorbereitet werden.

Das Projekt Gaia-X 4 moveID, mit einer Laufzeit von 39 Monaten ab dem 1. Juli 2022, erforderte eine signifikante Eigenleistung der Partner, was deren Interesse am langfristigen Erfolg sicherstellte. Diese öffentlich-private Partnerschaft sollte das Risiko bei vorwettbewerblicher Forschung senken und verpflichtet die Partner zur späteren Verwertung der Ergebnisse.

1.2.3 Die Rolle von 51nodes: Expertise, Führung im TP2 und Allianzen

Die Position von 51nodes im Projekt war von Beginn geprägt von seiner technologischen Expertise. 51nodes ist auf dezentrale Technologien wie Distributed Ledger Technology (DLT) und Self-Sovereign Identity (SSI) spezialisiert. Diese Expertise war eine fundamentale Voraussetzung, um die dezentrale Vision von Gaia-X im Projekt moveID technisch umzusetzen. Vor diesem Hintergrund war 51nodes u.a. im Zentrum der technischen Entscheidungsfindung positioniert und verantwortlich für die Definition der Systemarchitektur im Teilprojekt 2. 51nodes übernahm zudem die gesamte Leitung des Teilprojekts 2, das für Schaffung der Grundlagen einer digitalen Identitätsinfrastruktur für ein dezentrales Mobilitätsdiensteökosystem verantwortlich war.

Strategische Partnerschaften und Ökosystem-Integration

Eine entscheidende Voraussetzung war die etablierte Arbeitsbeziehung zwischen 51nodes und dem Konsortialführer Bosch im Bereich „DLT Mobility“. Diese vorab bestehende Beziehung ermöglichte eine reibungslose Anlaufphase.

Zusätzlich brachte 51nodes Verbindungen zu wichtigen Ökosystemen ein wie:

- **IDUnion[3]:** IDUnion ist eine Europäischen Genossenschaft für ein dezentrales Identitätsnetzwerk, womit moveID eine Anbindung für seine Identitätsinfrastruktur in Betracht ziehen konnte. Dies zielte auf Interoperabilität mit der zukünftigen European Digital Identity (EUDI) Wallet, die im Rahmen von eIDAS 2.0 entwickelt wird [Ehrlich et al., 2021].
- **Blocklab[4]:** Diese Verbindung bot Bezüge zur angewandten DLT-Forschung, beispielsweise im Umfeld von Fraunhofer-Instituten, sicherte den Zugang zu neuestem Wissen und validierten Technologien in moveID.

1.2.4 Das regulatorische und rechtliche Umfeld (Mitte 2022)

Die Architektur von moveID musste von Beginn an innerhalb eines komplexen rechtlichen Rahmens konzipiert werden, der Datenschutz, Datenhoheit und Privatsphäre der Nutzer im digitalen Identitätsmanagement auf einer dezentral organisierten Mobilitätsdiensteplattform berücksichtigte.

Die eIDAS-Verordnung bildete den zentralen Rechtsrahmen für digitale Identitäten. Angesichts der Novellierung (eIDAS 2.0[5]) wurde die SSI-Welt mit der rechtlich anerkannten Welt qualifizierter elektronischer Nachweise verbunden [Ehrlich et al., 2021].

Der Data Governance Act (DGA[6]) und der Data Act schufen den Rahmen für den Datenaustausch. Der DGA zielt darauf ab, das Vertrauen in Datenintermediäre zu stärken, während der Data Act Nutzern das Recht einräumt, auf die von vernetzten Geräten erzeugten Daten zuzugreifen und diese zu teilen. Die Architektur von moveID hatte die Anforderung, so gestaltet zu werden, dass sie diese Nutzerrechte technisch umsetzen könnte.

Aufgrund marktdominanter Unternehmen gerade im Cloudumfeld war das Kartellrecht von hoher Relevanz [Haucap, 2021]. Das modernisierte deutsche Wettbewerbsrecht (GWB[7]) erfasst die Marktmacht digitaler Plattformen strenger. Die Entscheidung für eine dezentrale Architektur auf Basis von DLT und SSI war daher nicht nur eine technische, sondern auch eine strategische Maßnahme zur Minderung kartellrechtlicher Risiken, da sie ein System per se widerstandsfähiger gegen den Vorwurf der Marktabschottung machen können.

---

[3] https://idunion.org/

[4] https://blocklab.de/

[5] https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/policies/eidas-regulation

[6] https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/data-governance-act

[7] https://www.gesetze-im-internet.de/gwb/

1.2.5 Wichtige technische Entwicklungsparadigmen der Automobilität

Das Projekt baute auf technologischen Umwälzungen in der Automobilindustrie auf, die als technische Voraussetzungen für ein vernetztes Mobilitätsdiensteökosystem gesehen werden können.

Software-Defined Vehicle (SDV) und Car-to-Cloud

Der Übergang zum Software-Defined Vehicle (SDV) ist ein entscheidender Wandel. Traditionelle Architekturen mit isolierten Steuergeräten werden durch zentralisierte, serviceorientierte Architekturen abgelöst, die Hardware und Software trennen [Zhu et al., 2021]. Dies schafft eine Plattform, auf der Fahrzeugdaten aggregiert und über standardisierte Schnittstellen bereitgestellt werden können [Juliussen, 2022].

Die permanente Car-to-Cloud-Konnektivität über 5G-Netze bildet das Rückgrat für datenbasierte Dienste [Lampinen, 2021]. Plattformen wie die „Continental Automotive Edge“ (CAEdge[8]) verwalten den Datenfluss vom Fahrzeug in die Cloud und stellten eine mögliche Kommunikationsschicht für moveID dar.

Integration mit Smart-City-Infrastrukturen

Der volle Wert von Fahrzeugdaten entfaltet sich oft erst in Kombination mit Daten aus der Smart-City-Infrastruktur, die Informationen über Verkehrsflüsse, Parkplätze oder Ladeinfrastruktur bereitstellt [Hammad et al., 2021]. Die Verwendung von SSI in moveID konnte dabei helfen, die in diesem Kontext bestehenden Herausforderungen bezüglich Vertrauenswürdigkeit und Datensicherheit zu adressieren [James et al., 2022].

1.2.6 Angrenzende Datenraum-Ökosysteme

Gaia-X 4 moveID startete als Projekt im Kontext bereits bestehender Datenrauminitiativen. Eine klare strategische Positionierung und die Sicherstellung der Interoperabilität waren daher von Anfang an angedacht.

Catena-X und der Datenraum Mobilität

Catena-X[9] ist ein an Gaia-X ausgerichtetes Datenökosystem für die Wertschöpfungskette der Automobilindustrie, das sich auf Lieferketten und Nachhaltigkeitsanforderungen konzentriert. Während Catena-X die „Geburt“ des Fahrzeugs abdeckt, fokussierte sich moveID auf dessen „operatives Leben“. Daraus ergab sich der Wunsch für moveID, die Architektur interoperabel mit Catena-X auszulegen.

Der Datenraum Mobilität (MDS[10]) ist eine weitere Initiative, die einen Marktplatz für den Austausch von Mobilitätsdaten schafft. Die Beziehung ist komplementär: moveID war fahrzeugzentriert, während der MDS einen systemischen Ansatz verfolgt. Eine technische und semantische Interoperabilität mit moveID wurde erstrebenswert erachtet [Heinbach et al., 2022].

---

[8] https://www.continental.com/de/presse/pressemitteilungen/20230614-continental-techshow-topicfield/

[9] https://catena-x.net/

[10] https://mobility-dataspace.eu/de/

Das Gaia-X Trust Framework

Eine wichtige Voraussetzung für jedes Gaia-X-Projekt ist die Konformität mit dem Gaia-X Trust Framework[11]. Dieses Regelwerk definiert die Mindestanforderungen für die Teilnahme am Ökosystem und nutzt maschinenlesbare Selbstbeschreibungen zur automatisierten Überprüfung der Compliance. Dies war eine wichtige Anforderung für moveID, die eine Vielzahl von architektonischen Entscheidungen im Teilprojekt 2 beeinflusste.

Initiative	Primäre Domäne	Kernziel	Hauptakteure
Gaia-X 4 moveID	Fahrzeug & Fahrer im Betrieb	Ermöglichung neuer, datengetriebener Mobilitätsdienste durch souveräne Identitäten.	Automobilhersteller, Zulieferer, Mobilitätsdienstleister
Catena-X	Automotive Wertschöpfungskette	Schaffung eines Datenraums für die Lieferkette zur Steigerung von Effizienz und Nachhaltigkeit.	OEMs, Zulieferer (Tier-n), Logistikunternehmen
Datenraum Mobilität	Gesamtmobilitätssystem	Schaffung eines Marktplatzes für multimodale Mobilitätsdaten zur Förderung innovativer Verkehrslösungen.	Verkehrsunternehmen, Kommunen, Automobilindustrie

Tabelle 1: Verwandte Datenrauminitiativen (Autoren: moveID-Konsortium)

1.2.7 Zusammenfassung

Die Analyse der Voraussetzungen und Rahmenbedingungen zum Projektstart von Gaia-X 4 moveID zeigt eine Vielzahl zu berücksichtigenden Gegebenheiten. Die darauf aufbauende Konzeption der Systemarchitektur von moveID integrierte die Anforderungen des Kartellrechts, der europäischen Datenregulierung und der Wunsch nach Interoperabilität mit existierenden Datenräumen.

51nodes nahm bei der Konzeption der Systemarchitektur eine Gestaltungsrolle ein, die auf einer Konvergenz wichtiger Faktoren beruhte: eine firmenintern hohe Expertise in DLT und SSI, eine etablierte Zusammenarbeit mit dem Konsortialführer Bosch und die strategisch diskutierte Anbindung an Ökosysteme wie Catena-X und IDUnion sowie relevante Forschungs- und Anwendernetzwerke.

[11] https://gaia-x.eu/gaia-x-framework/

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt Gaia-X 4 moveID kann als Beitrag zur Überwindung der Adaptionshürden von SSI verstanden werden durch:

Senkung der technischen Hürden: Durch die Schaffung einer offenen Systemarchitektur, die auf Open Source-Bestandteile setzt, wurde die technische Eintrittsbarriere für andere Entwickler und Unternehmen gesenkt.

Demonstration des wirtschaftlichen Nutzens: Im Jahr 2023 wurde mit dem IAA-Demonstrator ein wirtschaftlich relevanter Anwendungsfall (Peer-2-Peer Parken und Laden) realisiert. Damit ließ sich der Business Case für SSI artikulieren und perspektivisch Investitionsentscheidungen in Unternehmen motivieren.

Die Aktivitäten von 51nodes konzentrierten sich vor diesem Hintergrund auf das Teilprojekt 2 (TP2), „Infrastruktur Ökosystem / Nachweis Dezentralität & Austauschbarkeit“, das einen technologischen Kern des Vorhabens bildete. Hier übernahm 51nodes eine steuernde Rolle, die bedeutend über die ursprünglich geplanten Aufgaben hinausging und zum Erfolg des Projekts beitrug. Obwohl nicht explizit im Vorhabenplan vorgesehen, übernahm 51nodes in enger Abstimmung mit dem Konsortialführer Bosch von Beginn an eine maßgebliche Leitungs- und Koordinationsfunktion für das gesamte TP2. Dies umfasste die detaillierte Planung der Arbeitspakete, die Organisation der Partnerbeiträge, die Strukturierung der Ergebnisse und Editierung von Arbeitsberichten.

Um eine effiziente und transparente Zusammenarbeit zu gewährleisten, etablierte 51nodes eine moderne digitale Arbeitsumgebung mit Werkzeugen wie Miro-Boards für die konzeptionelle Arbeit, die Strukturierung einer Nextcloud-Instanz für die zentrale Dateiablage, einen gitlab-Repository-Bereich und einen Slack-Kanal für die Teilprojekt-Kommunikation.

Ein wesentliches Merkmal des Vorgehens war der kollaborative Ansatz. 51nodes initiierte und moderierte zahlreiche Workshops, um Anforderungen zu erheben und gemeinsame Berichte zu erstellen. Hervorzuheben ist der Austausch mit externen Stakeholdern der SSI-Community, wie IDunion, walt.id und cheqd, um die Projektergebnisse am internationalen Stand der Technik auszurichten und um auf Interoperabilität hinzuarbeiten.

Im TP2 wurden unter maßgeblicher Leitung und Mitwirkung von 51nodes die folgenden Arbeitspakete bearbeitet:

- **AP 2.1 (Technologiesichtung):** 51nodes leitete dieses Arbeitspaket und organisierte die Erstellung eines umfassenden Berichts zur Evaluation relevanter Technologien. Die Analyse umfasste SSI-Konzepte, DLTs und digitale Mobilitätslösungen, wobei 51nodes eigene Evaluationsergebnisse, etwa zu den SSI-Lösungen von walt.id, beisteuerte.
- **AP 2.2 (Schnittstellen):** 51nodes organisierte die Erstellung eines Berichts zur Interoperabilität von SSI-Ansätzen und übergab die finale Editierung an den Partner ecsec. Ein wesentlicher Beitrag von 51nodes im AP 2.2 war der Aufbau von Kommunikationsstrukturen zu externen SSI-Stakeholdern, um praxisrelevante Erkenntnisse zu gewinnen.

- **AP 2.3 (Technische Systemarchitektur):** Die Arbeiten an der Systemarchitektur wurden von 51nodes frühzeitig initiiert und vorangetrieben, um eine solide Grundlage für das Gesamtprojekt zu schaffen. 51nodes entwickelte die erste Version der Grob-Systemarchitektur und entwarf Standardprozesse für das Auffinden, Buchen, Bezahlen und Abwickeln von Mobilitätsdiensten auf der avisierten moveID-Plattform. Später im Projektverlauf wurde die Federführung des AP 2.3 für die Fortschreibung der Systemarchitektur planmäßig an Bosch übergeben.
- **AP 2.4 (Pilotimplementierung):** Das AP wurde vom Partner datarella geleitet. 51nodes leistete einen entscheidenden Beitrag zum **IAA Mobility 2023 Demonstrator**, indem es die zentralen SSI-Komponenten für die Autorisierung und Reservierung von Park- und Ladevorgängen entwickelte, bereitstellte und integrierte. Angesichts der fortschreitenden technologischen Entwicklung initiierte 51nodes im späteren Projektverlauf zudem die Konzeption und Entwicklung eines neuen, auf aktuellen Open-Source-Bibliotheken (insbesondere dem walt.id Community Stack) basierenden **SSI-Softwareframeworks**, um die weitere Verwendbarkeit und Verwertbarkeit der Projektergebnisse zur Adaption von SSI sicherzustellen.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Dieser Abschnitt rekonstruiert den wissenschaftlichen und technischen Stand im Bereich der dezentralen digitalen Identitäten. Dieser Stand diente als Ausgangsbasis für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten von 51nodes im Projekt Gaia-X 4 moveID zu dessen Beginn Mitte 2022. Der Fokus lag auf den für das TP2 und die Aktivitäten von 51nodes relevanten Aspekte, insbesondere dem Aufbau einer digitalen Identitätsinfrastruktur für Mobilitätsdienste. Die Analyse dieses Kapitels umfasst die grundlegenden Architekturen, verfügbaren technologischen Implementierungen, relevanten Standards und die spezifischen Herausforderungen, die sich aus der Integration von Self-Sovereign Identity (SSI) in den Mobilitätsdienstesektor ergaben. Die technologische Ausgangslage war ein sich entwickelndes und fragmentiertes Feld, das das Projekt zu wichtigen Auswahlentscheidungen zwang in den folgenden Bereichen.

1.4.1 Das Konzept der Self-Sovereign Identity (SSI)

Das Projekt Gaia-X 4 moveID wurde initiiert, um die Grundlagen für ein dezentrales, souveränes Daten- und Service-Ökosystem für die Mobilität der Zukunft zu schaffen. Eine fundamentale Herausforderung hierbei war die Abwesenheit einer sicheren, anbieterübergreifenden und nutzerzentrierten digitalen Identitätsschicht im Internet, was zu Datensilos, Betrug und mangelnder Datensicherheit führen kann. Insbesondere in der zunehmend autonomen Kommunikation zwischen Fahrzeugen, Verkehrsinfrastruktur und Dienstanbietern (Vehicle-to-Everything, V2X[12]) ist eine robuste Identitätslösung unabdingbar. SSI wurde als technologische Ant-

[12] https://www.it-schulungen.com/wir-ueber-uns/wissensblog/v2x-vehicle-to-everything-die-zukunft-der-vernetzten-mobilitaet.html

wort auf diese Herausforderung identifiziert, da es die Kontrolle über digitale Identitäten vollständig in die Hände der Nutzer legt und somit eine Grundvoraussetzung für eine souveräne digitale Mobilität schafft. SSI ermöglicht Nutzern, ihre digitalen Identitäten und die dazugehörigen Daten selbst zu erstellen, zu besitzen und vollständig zu kontrollieren, ohne auf die Genehmigung oder die Infrastruktur eines zentralen Vermittlers angewiesen zu sein. SSI ermöglicht Interaktionen, die auf den Prinzipien der Datenminimierung und des selektiven Offenlegens beruhen, bei denen der Inhaber nur die für eine Transaktion notwendigen Informationen preisgeben kann.

1.4.2 Das Architekturmodell von Trust over IP

Als führendes Architekturmodell zur Strukturierung von SSI-Ökosystemen hatte sich bis 2022 der vier-schichtige Stack der Trust over IP (ToIP[13]) Foundation etabliert. Dieses Modell war für moveID von besonderer Relevanz, da es nicht nur technologische Komponenten, sondern zudem auch die notwendigen Governance-Strukturen betrachtet – ein Ansatz, der gut mit der Philosophie von Gaia-X harmoniert, eine technische Infrastruktur untrennbar mit einem Regelwerk zu verbinden. Der ToIP-Stack bot dem Projekt somit ein vorgefertigtes Architekturmuster, das diese duale Anforderung inhärent abbildete. Er besteht aus vier Schichten, die jeweils eine Technologie- und eine Governance-Ebene umfassen:

1. **Schicht 1: Public Utilities (Öffentliche Versorgungsdienste):** Das technologische Fundament, das die *Verifiable Data Registries* (VDRs) wie Blockchains oder Distributed Ledgers umfasst, auf denen dezentrale Identifikatoren (DIDs) verankert werden.
2. **Schicht 2: Trust Spanning (Vertrauensaufbau):** Ermöglicht sichere Peer-to-Peer-Kommunikationskanäle zwischen zwei Parteien, typischerweise über Protokolle wie DIDComm.
3. **Schicht 3: Trust Tasks (Vertrauensaufgaben):** Auf dieser Schicht findet der Austausch von digitalen Nachweisen (*Verifiable Credentials*, VCs) und Präsentationen (*Verifiable Presentations*, VPs) statt.
4. **Schicht 4: Applications (Anwendungen):** Die anwendungsspezifischen Ökosysteme, wie das von moveID für Mobilitätsdienste, die auf den unteren Schichten aufbauen.

[13] https://www.trustoverip.org/

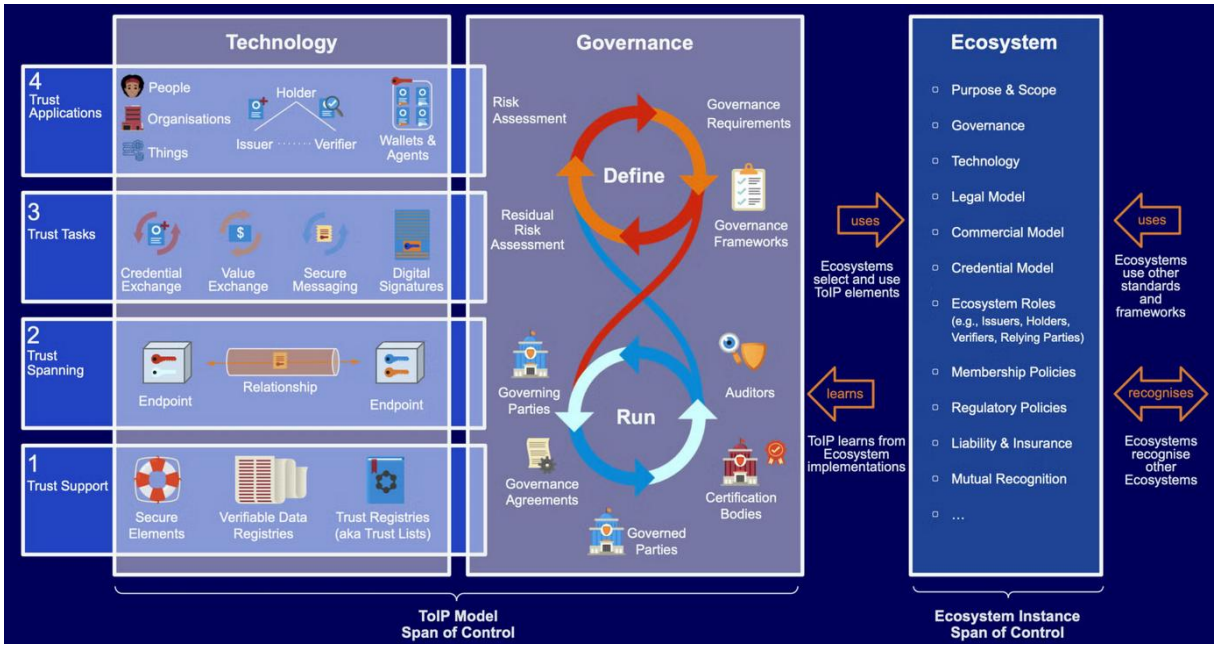


Abbildung 2: ToIP Architekturmodell (Quelle: https://www.trustoverip.org/toip-model/, abgerufen 2025-12-16)

1.4.3 W3C-Standards als Eckpfeiler

Der Projektstart Mitte 2022 markierte einen kritischen Wendepunkt im SSI-Ökosystem, da grundlegende Standards des World Wide Web Consortiums (W3C) finalisiert wurden. Diese schufen eine solide Basis für die Entwicklung von SSI-Systemen.

Decentralized Identifiers (DIDs) v1.0

Die W3C-Spezifikation für DIDs[14] wurde im Juli 2022 als offizielle Empfehlung verabschiedet und definiert einen neuen Typ von global eindeutigen, dezentralen Identifikatoren. Ein DID ist eine Textzeichenfolge mit der Syntax $did:method:specific-id$, wobei die Methode ($method$) festlegt, wie der DID auf einem spezifischen VDR verwaltet wird. Ein DID ist lediglich ein Zeiger; der Prozess der DID-Auflösung führt zu einem zugehörigen DID-Dokument. Das Dokument enthält diese Angaben:

- **Verification Methods:** Eine Liste öffentlicher kryptografischer Schlüssel zur Authentifizierung des DID-Inhabers.
- **Service Endpoints:** Netzwerkadressen für die Interaktion, z. B. für den Empfang von Kommunikationsnachrichten.
- **Authentication:** Spezifische Verweise auf Schlüssel, die für die Authentifizierung vorgesehen sind.

Verifiable Credentials (VCs) Data Model

[14] https://www.w3.org/TR/did-1.0/

Das W3C-Datenmodell für Verifiable Credentials[15] definiert eine standardisierte Struktur für digitale Nachweise, die fälschungssicher, datenschutzfreundlich und maschinenlesbar sind. Die Architektur basiert auf drei Rollen:

- **Issuer (Aussteller):** Eine Entität (z. B. Behörde, Unternehmen), die Behauptungen (Claims) über ein Subjekt aufstellt und diese in einem VC digital signiert.
- **Holder (Inhaber):** Das Subjekt des VC (z. B. Person, Fahrzeug), das die VC in einer digitalen Wallet speichert und die volle Kontrolle darüber hat.
- **Verifier (Prüfer):** Eine Entität, die einen Nachweis vom Holder anfordert und dessen kryptografische Gültigkeit überprüft.

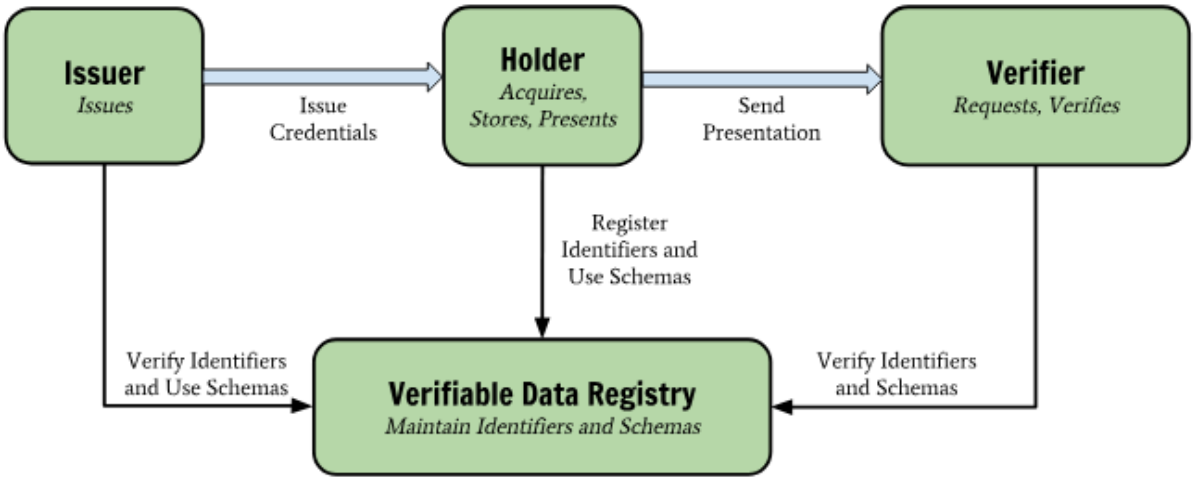


Abbildung 3: Rollen und Bestandteile bei Selbstsouveränen digitalen Identitäten (Quelle: https://www.w3.org/TR/vc-data-model-1.0/, abgerufen 2025-12-16)

Ein VC besteht aus Metadaten, dem *credentialSubject* (die eigentlichen Behauptungen) und einem kryptografischen *proof* (z. B. eine digitale Signatur). Um einen Nachweis zu erbringen, erstellt der Holder eine **Verifiable Presentation (VP)**, die eine oder mehrere VCs enthält und ebenfalls signiert wird. Ein entscheidendes Merkmal ist die Möglichkeit der **Selective Disclosure**, bei der der Holder nur die für die Transaktion relevanten Teile eines VC preisgibt und so dem Prinzip der Datenminimierung folgt.

1.4.4 Verifiable Data Registries für SSI-Netzwerke

Die Wahl des Verifiable Data Registry (VDR[16]) ist eine grundlegende Entscheidung, da es als Vertrauensanker ("Root of Trust") für DIDs dient und auch den Widerruf von VC ermöglicht. Die VDR-Landschaft im Jahr 2022 spiegelte die breitere Evolution im DLT-Bereich wider: eine Bewegung weg von monolithischen Architekturen hin zu modularen und interoperablen Systemen, die Blockchain-basiert sein konnten aber nicht mussten. Die Evaluation im Projekt umfasste folgende Optionen:

[15] https://www.w3.org/TR/vc-data-model-1.0/ (Stand 2019)

[16] https://www.w3.org/TR/vc-data-model-2.0/#dfn-verifiable-data-registries

- **Hyperledger Indy[17]:** Lange Zeit der De-facto-Standard für SSI, als zweckgebundene, berechtigungsbasierte DLT für Identitätsmanagement optimiert. Zu den Nachteilen zählten jedoch die zentralisierte Governance der SSI-Netzwerke (z.B. Sovrin[18], IDunion), hohe Betriebskosten für Knotenbetreiber und eine historische Inkompatibilität mit dem finalen W3C-DID-Standard [Hyperledger Foundation, 2022a].
- **General-Purpose Blockchains:** Öffentliche Blockchains wie Ethereum boten hohe Flexibilität und Zugang zu einem großen Entwickler-Ökosystem, litten aber unter volatilen und teilweise hohen Transaktionsgebühren und Skalierungsherausforderungen.
- **Interoperabilitäts-Ökosysteme:** Neuere Blockchain-Frameworks wie Cosmos und Polkadot ermöglichten die Erstellung anwendungsspezifischer, souveräner Blockchains, die über standardisierte Protokolle (z.B. IBC[19]) kommunizieren können. Der Projektpartner peaq baute auf diesen Frameworks (Polkadot) auf und versprach Lösungen für die Skalierungs- und Governance-Probleme älterer Architekturen.
- **Das Sidetree-Protokoll**[20] ist ein Ansatz, um öffentliche Identifikatoren zu speichern und zu verwalten. Es kann auf verschiedenen Blockchain-Netzwerken implementiert werden – Ein Beispiel ist Microsofts ION-Netzwerk[21] auf Bitcoin. Sidetree ist ein Layer-2-Ansatz der tausende von DID-Operationen in einer einzigen Transaktion bündelt, was die Skalierbarkeit drastisch erhöht und die SSI-Funktionalität von der Performance der Basisschicht entkoppelt.

1.4.5 SSI-Software Development Kits

Die Brücke zwischen abstrakten Konzepten und lauffähiger Software wird durch Software Development Kits (SDKs) geschlagen. moveID zog unter anderem die folgenden in Betracht:

- **Hyperledger Aries**[22]: Das historisch dominierende Ökosystem, das eine Sammlung von Frameworks für die Entwicklung von SSI-Anwendungen bietet. Seine Stärken lagen in der Reife und einer großen Community. Die entscheidende Schwäche war jedoch die enge Kopplung an Hyperledger Indy als VDR und das DIDComm v1 Protokoll, was die Flexibilität einschränkte und einen Lock-in-Effekt erzeugt hätte [Hyperledger Foundation, 2022b].
- **Moderne, modulare SDKs:** Als Reaktion auf die Rigidität von Aries entstand eine neue Generation von Toolkits, die auf Modularität und Ledger-Agnostizismus setzten. Die Evaluation von moveID konzentrierte sich auf mehrere dieser seinerzeit aufstrebenden Optionen:

[17] https://hyperledger-indy.readthedocs.io/en/latest/

[18] https://github.com/sovrin-foundation/sovrin

[19] https://ibcprotocol.dev/

[20] https://identity.foundation/sidetree/spec/

[21] https://identity.foundation/ion/

[22] https://lf-hyperledger.atlassian.net/wiki/spaces/ARIES/overview

- **walt.id[23]:** Ein in Kotlin geschriebenes, quelloffenes Toolkit, das sich durch die Unterstützung einer breiten Palette von DID-Methoden und VC-Formaten auszeichnete. Entscheidend für die Wahl durch das Projekt war die frühe und konsequente Implementierung der OpenID Connect for Verifiable Credentials (OIDC4VC)-Protokollfamilie und die explizite Ausrichtung an den Anforderungen von EBSI und Gaia-X [walt.id, 2022].
- **Veramo[24]:** Ein hochmodulares JavaScript/TypeScript-Framework, das über ein Plugin-System eine flexible Anpassung an verschiedene VDRs und Protokolle ermöglicht(e) [Veramo, 2022].
- **Sphereon[25]:** Ein weiteres TypeScript-basiertes SDK mit einem ähnlichen Funktionsumfang, das ebenfalls OIDC4VC unterstützte und eine mobile Wallet anbot.

moveID entschied, auf walt.id zu setzen, um flexibel auf verschiedene DLTs reagieren zu können, einen Protokoll-Lock-in zu vermeiden und sich proaktiv an der aufkommenden europäischen Regulierungslandschaft (eIDAS 2.0) auszurichten, die klar in Richtung OIDC4VC tendierte.

1.4.6 DID-Methoden

Die Wahl der DID-Methode bestimmt wichtige Eigenschaften eines DID wie Kosten, Sicherheit und Dezentralität. Die Evaluation im Rahmen von moveID umfasste eine Reihe von Kandidaten mit unterschiedlichen Kompromissen:

- $did:key$: Erzeugt einen DID direkt aus einem Schlüsselpaar. Dies ist einfach zu handhaben für kurzlebige Interaktionen, aber ohne Mechanismus zur Schlüsselrotation und daher ungeeignet für langlebige Identitäten.
- $did:web$: Verankert das DID-Dokument auf einer Webseite. Dieser pragmatische, kostengünstige Ansatz wurde als initialer Standard in moveID für die erforderliche Gaia-X-Konformität ausgewählt. Er schuf eine entscheidende Brücke zwischen der neuen Welt der DIDs und der bestehenden, vertrauenswürdigen Web-Infrastruktur (DNS, X.509-Zertifikate) und senkte so die Eintrittsbarriere für Organisationen erheblich.
- $did:ethr$: Verankert DIDs auf der Ethereum-Blockchain.
- $did:ebsi$: Die offizielle DID-Methode der European Blockchain Services Infrastructure (EBSI[26]).
- $did:indy$: Spezifisch für Hyperledger Indy-Netzwerke.
- $did:cheqd$ und $did:peaq$: Weitere DID-Methoden, die die Vorteile der Cosmos- bzw. Polkadot-Ökosysteme nutzen.

---

[23] https://walt.id/

[24] https://veramo.io/

[25] https://github.com/Sphereon-Opensource

[26] https://ec.europa.eu/digital-building-blocks/sites/spaces/EBSI/pages/447687044/Home

1.4.7 Kommunikationsprotokolle: DIDComm vs. OpenID Connect

Die Art und Weise, wie VCs zwischen den Parteien ausgetauscht werden, wird durch das Kommunikationsprotokoll bestimmt. Im Jahr 2022 standen sich hier zwei grundlegend unterschiedliche Ansätze gegenüber, deren Wahl eine der zentralen strategischen Weichenstellungen in moveID darstellte.

- **DIDComm[27]:** Ein von der Decentralized Identity Foundation (DIF) standardisiertes Protokoll, konzipiert für eine reichhaltige, asynchrone und sichere Peer-to-Peer-Kommunikation. Es ist transportagnostisch und verkörpert die dezentrale Philosophie von SSI, indem es direkte, verschlüsselte Kanäle zwischen den Agenten (Software-Repräsentanten) der Teilnehmer ermöglicht.
- **OpenID Connect for Verifiable Credentials (OIDC4VC[28]):** Dieser Ansatz erweitert(e) den weit verbreiteten OpenID Connect Standard (der auf OAuth 2.0 aufbaute) für den Umgang mit VCs. Seine größte Stärke lag in der einfachen Integration in die bestehende Web- und App-Infrastruktur. Seine explizite Nennung im Architektur- und Referenzframework[29] für die EU Digital Identity Wallet[30] verlieh ihm eine enorme strategische Bedeutung im europäischen Kontext.

Im Vergleich bot OIDC4VC den pragmatischeren und vor allem regulatorisch abgesicherten Weg für eine EU-weite Interoperabilität. Dieses Protokoll wurde daher in moveIDs Architekturspezifikation aufgenommen.

1.4.8 Das Gaia-X Trust-Framework

Ein Ziel von moveID war eine Integration in die übergeordnete Gaia-X-Architektur. Dies erforderte eine Orientierung an den Regeln des Gaia-X Trust Frameworks, das Vertrauen, Compliance und Interoperabilität sicherstellen sollte. Technisch basiert(e) das Framework auf Self-Descriptions (SDs): maschinenlesbare, kryptografisch gesicherte Dokumente, die als Verifiable Credentials modelliert waren und in denen Teilnehmer ihre Konformität zu den Gaia-X-Regeln beschrieben.

Die **Gaia-X Federation Services (GXFS)**, die damaligen Referenzimplementierungen für Gaia-X-Ökosysteme, waren 2022 fragmentiert und nicht miteinander interoperabel, eingehend betrachtet wurden z.B.:

- **Eclipse Dataspace Connector (EDC[31]):** Ein strukturierter, industriegetriebener Ansatz, der aus der International Data Spaces Association (IDSA[32]) hervorging. Er galt

[27] https://identity.foundation/didcomm-messaging/spec/

[28] https://openid.net/sg/openid4vc/

[29] https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/library/european-digital-identity-wallet-architecture-and-reference-framework

[30] https://ec.europa.eu/digital-building-blocks/sites/spaces/EUDIGITALIDENTITYWALLET/overview

[31] https://eclipse-edc.github.io/

[32] https://internationaldataspaces.org/

als vielversprechend, aber auch als komplex, und seine SSI-Integration war 2022 noch nicht ausgereift.

- **Eclipse Cross-Federation Service Components (XFSC[33]):** Ein identitäts-zentrierter Ansatz, der stark aus dem Hyperledger-Ökosystem hervorging. Zum Zeitpunkt der Evaluation litt er jedoch unter einem geringen technologischen Reifegrad (TRL 2-4) und unterstützte das aktuelle Gaia-X Trust Framework noch nicht.

Schließlich, aus dem Umfeld der Projektpartner, existiert(e) der Ansatz von **Pontus-X & Ocean Protocol[34]** mit einer dezentral orientierten, Web3-nativen Ausrichtung. Er nutzte eine EVM-Blockchain und Smart Contracts, um Datendienste als handelbare Vermögenswerte abzubilden und ermöglichte "Compute-to-Data"-Funktionen für verbesserten Datenschutz. Entscheidend war, dass Pontus-X, entwickelt vom moveID-Partner deltaDAO (als Vertreter von BigChainDB), als einziges der evaluierten Systeme bereits eine funktionierende Integration des Gaia-X Trust Frameworks und der Compliance-Prüfung vorweisen konnte. Dies machte es zur technologisch reifsten Option zum Projektstart.

1.4.9 eIDAS 2.0 und die EUDI-Wallet

Die technologische Landschaft für digitale Identitäten in Europa wurde 2022 maßgeblich durch den Vorschlag der Europäischen Kommission zur Überarbeitung der eIDAS-Verordnung (hin zu eIDAS 2.0) geprägt. Dieser Vorschlag sah die Einführung einer **European Digital Identity (EUDI) Wallet** vor – einer mobilen Anwendung, die es allen EU-Bürgern ermöglichen sollte, ihre digitalen Identitäten und Nachweise (VC) sicher zu verwalten und europaweit zu nutzen [Europäische Kommission, 2021].

Dieser regulatorische Vorstoß war ein wichtiger Impuls, der SSI zu einem potenziell wichtigen Pfeiler der europäischen Digitalstrategie erhob. Er hatte tiefgreifende Auswirkungen auf die technologischen Entscheidungen im SSI-Bereich:

- **Stärkung von OIDC4VC:** Das Architektur- und Referenzframework für die EUDI-Wallet nannte explizit die Protokolle der OIDC4VC-Familie, was diesem Standard de facto einen quasi-offiziellen Status in Europa verlieh.
- **Fokus auf mobile Anwendungsfälle:** Die Konzeption als mobile Wallet rückte Standards wie ISO/IEC 18013-5 für mobile Führerscheine (mDL) in den Vordergrund.
- **Brücke zwischen SSI und regulierter Welt:** eIDAS 2.0 schuf den rechtlichen Rahmen, um die dezentrale SSI-Welt mit der regulierten Welt der qualifizierten Vertrauensdienste zu verbinden.

Für moveID bedeutete diese regulatorische Entwicklung in der EU, dass eine zukunftsfähige Architektur für moveID von Anfang an die Kompatibilität mit dem aufkommenden eIDAS 2.0-Ökosystem sicherstellen musste, was die strategische Bedeutung von OIDC4VC und flexiblen SDKs wie walt.id weiter hervorhob.

[33] https://projects.eclipse.org/projects/technology.xfsc

[34] https://docs.pontus-x.eu/

1.4.10 Verwendungshürden von SSI

Die Fachliteratur und Praxiserfahrungen der Projektpartner identifizierten mehrere kritische Hindernisse für die Verwendung von SSI, insbesondere zum Projektstart 2022:

- **User Experience (UX) und Komplexität:** Für den Endnutzer war die Handhabung von SSI-Wallets oft noch zu komplex. Insbesondere die sichere Verwaltung von kryptografischen Schlüsseln (Key Management) und die Wiederherstellung des Wallets bei Geräteverlust (Recovery) stellten ungelöste Usability-Probleme dar, die eine breite Akzeptanz verhinderten [Satybaldy, 2023].
- **Governance und Vertrauen:** Der Aufbau eines dezentralen Ökosystems erfordert klare und vertrauenswürdige Governance-Strukturen. Wer darf Nachweise ausstellen? Wie wird die Vertrauenswürdigkeit von Teilnehmern sichergestellt? Die Etablierung dieser soziotechnischen Regelwerke ist eine komplexe Aufgabe.
- **Fehlende Geschäftsmodelle und Anreize:** Für viele Unternehmen war der Return on Investment (ROI) für eine Umstellung auf SSI noch nicht klar ersichtlich. Es fehlte an etablierten Geschäftsmodellen und starken Anreizen, um von bestehenden, funktionierenden (wenn auch zentralisierten) Identitätssystemen abzuweichen [Cohen, 2025].

1.4.11 Zusammenfassende Bewertung der Voraussetzungen für die Schaffung einer digitalen Identitätsinfrastruktur

Die Nutzung von SSI-Konzepten war im Mobilitätssektor im Jahr 2022 noch nicht umgesetzt. Zwar gab es theoretische Vorstellungen zur Nutzung, aber eine praktische Ertüchtigung der Fahrzeug- und Mobilitätsinfrastruktur sowie Smart-City-Verkehrsinfrastruktur fehlte.

Die fundamentalen Konzepte der Self-Sovereign Identity waren etabliert und durch die W3C-Standards auf eine solide Basis gestellt worden. Gleichzeitig war der Bereich der Implementierungen, Protokolle und Infrastrukturkomponenten von hoher Heterogenität und teilweiser Unreife geprägt. Es existierte kein einzelner, durchgängig überlegener Technologiestack, sondern ein Wettbewerb verschiedener Ansätze.

Aus Sicht von 51nodes waren die Voraussetzungen zu Projektbeginn auf Basis der Technologieanalyse durch das Fehlen einer praxistauglichen SSI-basierten Identitätsinfrastruktur für den Mobilitätssektor gekennzeichnet. Bestehende Ansätze für das digitale Identitätsmanagement basierten auf zentralen Plattformen und waren nicht für souverän verwaltete datenbasierte Services ausgelegt, wie sie Gaia-X ermöglichen sollte. Die Herausforderung bestand darin, die Konzepte und technische Lösungsansätze von SSI in eine prototypisch funktionierende, potenziell skalierbare und interoperable technische Identitätsinfrastruktur für den Mobilitätssektor zu überführen.

Die strategischen Technologieentscheidungen für die Architektur von moveID waren eine pragmatische Reaktion auf diesen Zustand. Die Wahl fiel daher auf jene Komponenten, die die höchste technologische Reife, die beste Ausrichtung an den aufkommenden europäischen Regulierungen (eIDAS 2.0) und die direkteste Kompatibilität mit dem Gaia-X Trust Framework versprachen.

Gleichzeitig wurden technologische Lücken und Forschungsherausforderungen identifiziert, insbesondere an den Schnittstellen zum Mobilitätssektor. Die fehlende Interoperabilität zwischen HTTP-basierten SSI-Protokollen und der verbindungslosen V2X-Kommunikation (ETSI

ITS-G5) sowie die Herausforderungen bei der Orchestrierung von Containern auf ressourcenbeschränkten Edge-Geräten im mobilen Fahrzeug wurden als kritische Bereiche für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Projekt (und darüber hinaus) definiert.

1.4.12 Technologische Schlussfolgerungen

Die folgende Tabelle fasst die Bewertung der Schlüsseltechnologien, ihren geschätzten Reifegrad (Technology Readiness Level, TRL) und die identifizierten Lücken zum Projektstart 2022 zusammen. Damit wird die technologische Ausgangsbasis, auf der das moveID-Projekt aufbaute, deutlich.

Technologie-gruppe	**Einsatzgebiet in moveID**	**Empfohlene Technologie für moveID**	**Technology Readiness Level (TRL)**	**Lücken aus Sicht von moveID (im Jahr 2022)**
Distributed Ledger Technology (DLT)	Abwicklung von (Zahlungs-)Transaktionen	Ethereum Mainnet, Polygon Mainnet	TRL 8-9	Skalierbarkeit und niedrige Kosten müssen in der (Vor-)Produktion nachgewiesen werden. Alternative DLTs könnten die Sicherheit beeinträchtigen.
SSI-Protokoll	Austausch von Anmeldedaten im Mobilitätsökosystem	OpenIDConnect	TRL 6-8	Das Gaia-X Trust Framework ist noch nicht fertiggestellt, und der Ende-zu-Ende-Austausch von Anmeldedaten für die (Vor-)Produktion muss abgeschlossen werden.
SSI Wallet	Identitätshosting und Speicherung von Anmeldedaten	walt.id, Sphereon, XFSC PCM/OCM	TRL 4-5	Die Schlüssel befinden sich für Demozwecke noch in JSON-Dateien. Signaturen und Schlüssel sollten in einer sicheren (Hardware-)Wallet gekapselt werden. Es gibt wenig Unterstützung für

				eingebettete Lösungen.
SSI SDK	SSI-Autorisierungs-Flow	walt.id	TRL 3-4	Die Qualität der Software und der Dokumentation kann verbessert werden.
SSI-Netzwerk	Öffentliches Verifiable Data Registry (VDR)	Cheqd, Hyperledger Indy (Sovrin, IDUnion)	TRL 6	Hyperledger-basierte Netzwerke haben hohe Nutzungskosten und noch kein nachhaltiges Geschäftsmodell.
DID-Methoden	Auflösung von Identitätsinformationen über Fahrzeuge und Dienste	DID:WEB	TRL 5-6	DID:WEB ist nicht ledgerbasiert, aber Gaia-X-konform. moveID plant, später auf eine andere Methode umzustellen.
V2X	Kommunikation zwischen Fahrzeugen, Diensten und Verkehrsinfrastruktur	ETSI ITS-G5 (IEEE 802.11p)	TRL 8	Verbindungslos, kein TCP/IP – was für SSI-Flows erforderlich ist.
SSI über V2X	Authentifizierung und Autorisierung von Fahrzeugen für Dienste	Möglicherweise DDS	TRL 2	Weitere Forschung erstrebenswert. DDS kann als Prototyp entwickelt werden.
Bezahltechnologie	Bezahlung von Mobilitätsdiensten	EUROe, USDC	TRL 8-9	Brücke zu FIAT. Blockchain-übergreifende Brücken.
Elektroauto-Laden	Laden als Mobilitätsdienst mit SSI-Authentifizierung	OCPP v1.6	TRL 6	Offen: Wie kann man sich mit SSI verbinden? ISO 15118 „Plug and Charge" verwendet PKI und nicht SSI.

Containertechnologie im Edge-Einsatz	Containerisierung von Softwarekomponenten im Auto	Kubernetes K8s, K3s	TRL 9 (cloud), TRL 6 (edge)	Die Cloud wird von der ausgereiften Kubernetes-Infrastruktur dominiert. Für den Edge-Einsatz war dies nicht so gut implementiert. Es wurde eine leichtere Paketverwaltung gewählt.
Softwareagenten	Integrations-Middleware zwischen verschiedenen Komponenten	Fetch micro agents	TRL 6	Agenten können unterschiedliche Teile der Systemarchitektur verbinden (SSI, Blockchain, OCPP, Infrastruktur)
Datenräume in GAIA-X	Bereitstellung von Daten, Software und Infrastruktur von Anbietern für Verbraucher	Pontus-X, EDC, XFSC	TRL 6-7 (Pontus-X), TRL 5 (EDC), TRL 2-4 (XFSC)	Die Interoperabilität zwischen Daten-Ökosystemdiensten ist im Jahr 2022 begrenzt. EDC und XFSC ohne Integration der Gaia-X-Konformität und des Trust Framework. Dokumentation und Stabilität sollten verbessert werden
Datenmarktplatz	Veröffentlichung von Fahrzeugdaten für Verbraucher gegen Gebühr	Ocean Protocol	TRL 6-7	Die Akzeptanz dieses Marktplatzes in der Community erscheint 2022 noch ausbaufähig
Mobilitätslösungen	Erlernen des Aufbaus und der Förderung eines Mobilitätsdienst-Ökosystems	Beobachtung der Entwicklungen bei MOBI	N/A	Der USA-Fokus von MOBI sollte bedacht werden

Tabelle 2: Übersicht der Schlüsseltechnologien, Reifegrad (TRL) nach Einschätzung des moveID-Konsortiums und Herausforderungen für moveID (Stand 2022)

1.4.13 Relevante Fachliteratur und Spezifikationen

Der wissenschaftliche und technische Stand im Jahr 2022 wurde durch eine Reihe von wichtigen Dokumenten und Spezifikationen gekennzeichnet, die als wesentliche Literatur zur Information für das moveID-Projekt dienten. Die nachfolgende Sammlung von Dokumenten bildete einen wesentlichen, aber nicht ausschließlichen Ausschnitt des Wissens, auf den sich 51nodes und die moveID-Partner bei der Konzeption und Umsetzung des Projekts stützten.

W3C-Spezifikationen:

- *Decentralized Identifiers (DIDs) v1.0*: Die grundlegende Spezifikation für die Syntax, das Datenmodell und die Verarbeitung von DIDs [W3C DID Working Group, 2022].
- *Verifiable Credentials Data Model v1.1/v2.0*: Definiert die Struktur und die semantischen Grundlagen für digitale Berechtigungsnachweise [W3C Verifiable Credentials Working Group, 2022].
- *Verifiable Credentials Use Cases*: Ein begleitendes Dokument, das die Anwendungsfälle und Anforderungen beschreibt, die die Entwicklung der Standards geleitet haben [W3C Verifiable Credentials Working Group, 2021].

OpenID Foundation (OIDF)-Spezifikationen:

- *OpenID for Verifiable Credential Issuance (OIDC4VCI)*: Definiert ein Protokoll für die Ausstellung von VCs, das auf OAuth 2.0 aufbaut [OpenID Foundation, 2022a].
- *OpenID for Verifiable Presentations (OIDC4VP)*: Definiert ein Protokoll für die Anforderung und Präsentation von VCs, ebenfalls basierend auf OAuth 2.0 [OpenID Foundation, 2022b].

Decentralized Identity Foundation (DIF)-Spezifikationen:

- *DIDComm Messaging*: Die Spezifikationen für das dezentrale Peer-to-Peer-Kommunikationsprotokoll [Decentralized Identity Foundation, 2022].

Standards für den Mobilitätssektor:

- *ETSI ITS-G5*: Die europäische Normenfamilie für die direkte V2X-Kommunikation [ETSI, 2019].
- *ISO/IEC 18013-5:2021*: Der internationale Standard für mobile Führerscheine (mDL), der für die EUDI-Wallet von großer Bedeutung ist [ISO/IEC, 2021].

Gaia-X

- *Gaia-X Architecture Document & Trust Framework*: Die offiziellen Dokumente der Gaia-X AISBL, die die Architektur und die Compliance-Regeln des Ökosystems festlegen [Gaia-X AISBL, 2022a & b].

Grundlegende Whitepaper und Architektur-Dokumente:

- *Trust over IP (ToIP) Foundation Publications*: Die Spezifikationen und Whitepaper, die den ToIP-Stack definieren [Trust over IP Foundation, 2022].
- *Kubernetes Patterns*: Als Beispiel für Fachliteratur zur Implementierung von Container-Technologien, wie im Projekt-Arbeitsbericht referenziert [Ibryam, & Huß, 2019].

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

1.5.1 SSI-Initiativen

51nodes organisierte für Gaia-X 4 moveID den Austausch mit den folgenden SSI-Initiativen und Organisationen, die Beiträge zum SSI-Ökosystem zur Projektlaufzeit leisteten. Die Erkenntnisse flossen in die Arbeitsergebnisse des Teilprojekt 2 ein.

Datum	SSI-Initiative	Erkenntnisse für moveID
2022-10-21	IDunion	Einführung und Nutzung des SSI-Netzwerks IDunion wurde erklärt.
2023-03-29	Danube-tech	Danubte-tech entwickelt Open-Source-SSI-Interoperabilitätslösungen unter der Haube des DIF, z.B. den universellen DID-Resolver. Sie verfügen über eine gehostete Plattform namens GoDiddy.
2023-05-23	Cheqd	Das SSI-Netzwerk Cheqd bietet einige Vorteile gegenüber Hyperledger Indy-basierten Netzwerken, z. B. niedrige Transaktionsgebühren, höhere Produktionsreife, ständige Weiterentwicklung und (kostenpflichtiger) Service. MoveID könnte auch einen Cheqd-Knoten hosten, was eine Senkung der Transaktionskosten verspricht.
2023-06-29	Sphereon	Ein SSI-SDK, das hohe Standards und Qualität verspricht.
2023-04-11	Walt.id	Walt.id bietet Open-Source-SSI-Softwareentwicklungskits in Kotlin, implementiert OpenIDConnect VI- und VP-Protokolle, stellt eine Software-Wallet bereit und bietet Funktionen zur Integration mit cheqd. MoveID plante, das SSI-Kit und das Wallet-Kit in seiner WP2.4-Pilotimplementierung für die IAA 2023-Demo für Park- und Ladevorgänge sowie entsprechende SSI-Abläufe zu verwenden.
2023-03-10	ATIB	Ein intermediärer Broker-Ansatz für die SSI-Interoperabilität, der auf der Seite des Dienstanbieters verwendet wird. Auf der Frontend-Seite verfügt er über eine oAUTH 2.0- und SAML-Schnittstelle für die Benutzerauthentifizierung. Auf der Backend-Seite stellt er eine Brücke zu SSI-basierten Identitäten und Netzwerken her.
2023-10-04	mySaveID	mySaveID kann als qualifizierter Vertrauensdienstleister fungieren, der mit eIDAS 2.0 und GAIA-X kompatibel ist. moveID kann in Betracht ziehen, ob mySaveID für vertrauenswürdige Identitäten und Berechtigungsnachweise für (große) Unternehmen verwendet werden soll, die eine Vertrauenshierarchie bis hin zu Bevollmächtigten, Mitar-

		beitern, Flotten, Fahrzeugen und Gegenständen aufbauen können, die sich im Besitz des Unternehmens befinden und von diesem betrieben werden.

Tabelle 3: Erkenntnisse aus dem Austausch mit SSI-Initiativen mit Stand zum jeweils angegebenen Zeitpunkt (Autoren: Achim Klein und das moveID-Konsortium)

1.5.2 Zusammenarbeit mit MOBI

Allgemeine Zielsetzung

Die Zusammenarbeit zwischen dem Projekt Gaia-X 4 moveID und MOBI (Mobility Open Blockchain Initiative[35]) war eine Interoperabilitätsinitiative, die vom Projektpartner Continental angestoßen wurde. Das übergeordnete Ziel war es, die Ansätze von moveID für dezentrale digitale Fahrzeugidentitäten mit dem von MOBI entwickelten Vehicle Identity Standard abzugleichen und eine technische Kompatibilität zu demonstrieren.

Im Kern ging es darum, einen gemeinsamen Prototyp und Demonstrator zu entwickeln, der zeigt, wie nachprüfbare Nachweise (Verifiable Credentials) zwischen dem moveID-Ökosystem und dem MOBI-Ökosystem ausgetauscht werden können. Damit sollte die technische Machbarkeit einer projektübergreifenden SSI-Interoperabilität nachgewiesen und die Grundlage für ein offenes, anbieterunabhängiges Mobilitätsökosystem gestärkt werden. Die Zusammenarbeit wurde auch in einer Pressemitteilung kommuniziert [Busch, 2024].

Beitrag von 51nodes

51nodes beteiligte sich von Beginn an an den Diskussionen mit MOBI. Basierend auf bereits außerhalb des Projekts gesammelten Erfahrungen mit MOBI brachte 51nodes seine Expertise in die konzeptionelle Ausgestaltung des gemeinsamen Interoperabilitätsdemonstrators ein.

Der spezifische Beitrag von 51nodes lag in der Diskussion und Ausarbeitung technischer Ansätze, insbesondere zur Nutzung des OpenIDConnect-Protokolls (OIDC) und abgestimmter Formate für die Verifiable Credentials, um den Austausch zwischen MOBI und moveID zu ermöglichen.

1.5.3 Zusammenarbeit mit Gaia-X 4 AGEDA

Allgemeine Zielsetzung

Die Zusammenarbeit zwischen dem Projekt Gaia-X 4 moveID und seinem Schwesterprojekt AGEDA (Anforderungen und Anwendungen von Gaia-X im Edge-Device Automobil[36]), das ebenfalls Teil der Gaia-X 4 Future Mobility Projektfamilie war, konzentrierte sich auf die Realisierung eines "Collective Vision"-Demonstrators. Der Demonstrator stellte eine Verkehrssituation dar, bei der von Fahrzeugen erkannte Objekte, wie z.B. Fußgänger, mit anderen Verkehrsteilnehmern geteilt werden sollten, um die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Eine technologische Herausforderung und das Ziel der Demonstration war es, nachzuweisen, dass dieser

[35] https://dlt.mobi/

[36] https://www.gaia-x4futuremobility.de/de/projects/ageda

Austausch sensibler Daten nicht unkontrolliert, sondern nur nach einer erfolgreichen Autorisierung mittels Self-Sovereign Identity (SSI) stattfindet. Der Demonstrator wurde zur Hannover Messe 2024 erfolgreich gezeigt.

Beitrag von 51nodes

51nodes brachte sein tiefgreifendes Fachwissen im Bereich Self-Sovereign Identity (SSI) in die Diskussionen um den Demonstrator in gemeinsamen Arbeitstreffen und Arbeitsgruppentreffen ein.

1.5.4 Zusammenarbeit mit Gaia-X 4 AMS

Allgemeine Zielsetzung und Demonstrator-Szenario

Zwischen den Schwesterprojekten Gaia-X 4 moveID und Gaia-X 4 AMS (Advanced Mobility Services[37]) wurde eine Zusammenarbeit initiiert, um die technologische Kompatibilität ihrer Ansätze zu demonstrieren.

Das zentrale Ziel der Kooperation war die Konzeption eines gemeinsamen Demonstrators zur Darstellung der projektübergreifenden Interoperabilität von Self-Sovereign Identity (SSI). Es sollte nachgewiesen werden, dass ein digitaler Nachweis (Verifiable Credential), der in einem Projekt-Ökosystem ausgestellt wird, vom System des anderen Projekts erfolgreich überprüft und akzeptiert werden kann.

Für diese Demonstration wurde ein sicherheitskritisches Szenario entworfen, das auf den Vorarbeiten des AMS-Projekts im Bereich der unbemannten Luftfahrt aufbaute: Eine Drohne aus dem AMS-Projekt erstellt ein Echtzeit-Lagebild für Einsatzkräfte, beispielsweise für die Feuerwehr. Der Zugriff auf diesen sensiblen Videostream ist geschützt und erfordert eine explizite Autorisierung. Diese Autorisierung erfolgt über die Präsentation eines SSI-basierten Nachweises. So wird sichergestellt, dass nur berechtigte Personen oder Systeme auf die kritischen Daten zugreifen können. Der Demonstrator wurde in der Projektlaufzeit schließlich nicht mehr vollständig umgesetzt.

Beitrag von 51nodes

Als wichtiger Akteur für die Entwicklung der SSI-Infrastruktur im moveID-Projekt war 51nodes an der Diskussion und vorbereitenden Konzeption dieses Interoperabilitäts-Demonstrators beteiligt. Der Beitrag von 51nodes bestand darin, die technische Expertise und in der Konzeption die notwendigen SSI-Komponenten für den Autorisierungsteil der Demonstration beizusteuern.

1.6 Literatur

Busch (2024). https://moveid.org/2024/04/23/mobi-and-gaia-x-4-moveid-start-interoperability-initiative-around-web3-digital-identities/

Cohen (2025). Self-sovereign identity could transform fraud prevention, but.. https://www.helpnetsecurity.com/2025/02/07/ssi-self-sovereign-identity/

Decentralized Identity Foundation. (2022). DIDComm Messaging v2.1 Specification. Abgerufen von https://identity.foundation/didcomm-messaging/spec/

[37] https://www.gaia-x4futuremobility.de/de/projects/ams

Ehrlich, T., Richter, D., Meisel, M. et al. (2021). Self-Sovereign Identity als Grundlage für universell einsetzbare digitale Identitäten. *HMD 58*, S. 247–270. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1365/s40702-021-00711-5.

ETSI. (2019). *ETSI EN 302 663 V1.3.1: Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band*. European Telecommunications Standards Institute. Abgerufen von https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302663/01.03.01_60/en_302663v010301p.pdf

Europäische Kommission. (2021). *Vorschlag für eine Verordnung über einen Rahmen für eine europäische digitale Identität*. COM(2021) 281 final. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021PC0281

Gaia-X 4 moveID Konsortium. (2022). *Wissenschaftlicher und technischer Stand der Self-Sovereign Identity im Kontext von Gaia-X 4 moveID zu Projektbeginn 2022*. Internes Projektdokument.

Gaia-X AISBL. (2022a). *Gaia-X Architecture Document - 22.04 Release*. Abgerufen von https://gaia-x.eu/wp-content/uploads/2022/06/Gaia-x-Architecture-Document-22.04-Release.pdf

Gaia-X AISBL. (2022b). *Gaia-X Trust Framework - 22.10 Release*. Abgerufen von https://docs.gaia-x.eu/policy-rules-committee/trust-framework/22.10/

Hammad, A., Najjar, M., Qualharini, E., Figueiredo, K., Haddad, A., Kasnar, A. and Soares, C. (2021). Multiple Dimensions of Smart Cities' Infrastructure: A Review. *Buildings*, 11. 10.3390/buildings11020073.

Haucap, J. (2021). Plattformökonomie und Wettbewerb. In: Kenning, P., Oehler, A., Reisch, L.A. (eds) *Verbraucherwissenschaften*. Springer Gabler, Wiesbaden. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-658-29935-4_23.

Heinbach, C. et al. (2022). 'Smart Managed Freight Fleet: Ein automatisiertes und vernetztes Flottenmanagement in einem föderierten Datenökosystem', *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik* [Preprint]. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1365/s40702-022-00887-4.

Hyperledger Foundation. (2022a). *Hyperledger identity community completes development of DID:Indy Method and advances toward a network of networks*. LF Decentralized Trust Blog. https://www.lfdecentralizedtrust.org/blog/2022/05/02/hyperledger-identity-community-completes-development-of-didindy-method-and-advances-toward-a-network-of-networks

Hyperledger Foundation. (2022b). *2022 Q3 Hyperledger Aries Report*. https://toc.hyperledger.org/project-reports/2022/2022-Q3-Hyperledger-Aries.html

Ibryam, B., & Huß, R. (2019). *Kubernetes Patterns: Reusable Elements for Designing Cloud-Native Applications*. O'Reilly Media.

ISO/IEC. (2021). *ISO/IEC 18013-5:2021: Personal identification — ISO-compliant driving licence — Part 5: Mobile driving licence (mDL) application*. International Organization for Standardization. Abgerufen von https://www.iso.org/standard/69084.html

James P., Jonczyk J., Smith L., Harris N., Komar T., Bell D. and Ranjan R. (2022). Realizing Smart City Infrastructure at Scale, in the Wild: A Case Study. *Frontiers in Sustainable Cities*, 4:767942. doi: 10.3389/frsc.2022.767942.

Juliussen, E. (2022). 'Perspectives on Automotive Operating Systems', *EE Times*, 16. Juni. Verfügbar unter: https://www.eetimes.com/perspectives-on-automotive-operating-systems/.

Lampinen, M. (2021). 'Car-to-cloud connects cars to value', *Automotive World*, 4. November. Verfügbar unter: https://www.automotiveworld.com/articles/car-to-cloud-connects-cars-to-value/.

OpenID Foundation. (2022a). *OpenID for Verifiable Credential Issuance (Working Group Draft)*. Abgerufen von https://openid.net/specs/openid-4-verifiable-credential-issuance-1_0.html

OpenID Foundation. (2022b). *OpenID for Verifiable Presentations (Working Group Draft)*. Abgerufen von https://openid.net/specs/openid-4-verifiable-presentations-1_0.html

Satybaldy, A. (2023). *Usability Evaluation of SSI Digital Wallets*. https://www.researchgate.net/publication/371198882_Usability_Evaluation_of_SSI_Digital_Wallets

Sphereon. (2022). *Digital Identity SDK*. https://sphereon.com/sphereon-ssi-sdk/

Sporny, M., Longley, D., Sabadello, M., Reed, D., Steele, O., & Allen, C. (2022, Juli). *Decentralized Identifiers (DIDs) v1.0*. W3C Recommendation. https://www.w3.org/TR/2022/REC-did-core-20220719/

Sporny, M., Sabadello, M., & Longley, D. (2022). *Decentralized Identifier Resolution*. W3C Draft Community Group Report. https://w3c-ccg.github.io/did-resolution/

Sporny, M., Longley, D., & Sabadello, M. (2022). *Verifiable Credentials Data Model v1.1*. W3C Recommendation. https://www.w3.org/TR/vc-data-model/

Trust over IP Foundation. (2022a, November). *Evolution of the ToIP Stack V1.0*. https://trustoverip.org/wp-content/uploads/Evolution-of-the-ToIP-Stack-V1.0-2022-11-14.pdf

Trust over IP Foundation. (2022b). *The ToIP Technology Architecture Specification V1.0*. Abgerufen von https://trustoverip.org/wp-content/uploads/ToIP-Technology-Architecture-Specification-V1.0-2022-11-14.pdf

Veramo. (2022). *Veramo - A JavaScript Framework for Verifiable Data*. https://veramo.io/

W3C Verifiable Credentials Working Group. (2021). *Verifiable Credentials Use Cases*. W3C Working Group Note. Abgerufen von https://www.w3.org/TR/vc-use-cases/

walt.id. (2022). *Verifiable Credentials: A Simple Guide to How They Work*. https://docs.walt.id/community-stack/concepts/digital-credentials/verifiable-credentials-w3c

Zhu, H., et al. (2021). "Requirements-driven automotive electrical/electronic architecture: a survey and prospective trends." *IEEE Access 9*, S. 100096-100112. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9466854.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die 51nodes GmbH trieb vor allem das Teilprojekt 2 voran und wirkte in geringem Maße in den Teilprojekten 3, 4 und 6 mit.

2.1.1 Teilprojekt 2: Infrastruktur Ökosystem / Nachweis Dezentralität & Austauschbarkeit

Im **Teilprojekt 2 (TP2): Infrastruktur Ökosystem / Nachweis Dezentralität & Austauschbarkeit** wurden folgende Ergebnisse nach Arbeitspaketen (AP) erzielt:

2.1.1.1 AP 2.1 Technologiesichtung, Bewertung der Technologien und weiterer Rahmenbedingungen

Ziele (Soll) nach Vorhabensbeschreibung (VHB):

- Verantwortliche Leitung der Technologiesichtung und Dokumentation
- Kollaborative Analyse von Konzepten, Technologien und Ansätze digital vernetzter Mobilitätslösungen
- Analyse prototypischer Technologieimplementierungen
- Recherche von Best-Practices
- Bewertung von Technologien und Mobilitätslösungen in Zusammenarbeit mit Partnern (zur Nutzung in AP 2.3)

Ergebnisse:

Unter der Leitung von 51nodes wurden in diesem Arbeitspaket gemeinsam mit den Partnern die beiden folgenden Ergebnisse und Arbeitsberichte erstellt und vorgelegt. Die beiden Arbeitsberichte legten den Grundstein für die späteren technologischen Entscheidungen im Rahmen der Pilotimplementierung in AP2.4 und stellten sicher, dass das Projekt auf einer fundierten und zukunftsfähigen technologischen Basis aufbaute.

Ergebnis E2.1.1: Analyse von SSI-Konzepten und Rahmenbedingungen als Input für AP2.3

Die Analyse E2.1.1 legte die Grundlage für die technologische Ausrichtung des Teilprojekts. Die Analyse besteht aus zwei Kernteilen: einer umfassenden Analyse relevanter Technologien und einer Untersuchung der externen Rahmenbedingungen.

Im ersten Teil, der Technologieanalyse, wurden die wesentlichen technologischen Säulen für moveID untersucht. Dazu zählten V2X (Vehicle-to-Everything) für die Fahrzeugkommunikation, Self-Sovereign Identity (SSI) für ein nutzerzentriertes Identitätsmanagement, Distributed Ledger Technology (DLT) als mögliche Basis für Verifiable Data Registries und ökonomische

Transaktionen sowie Container-Technologien für den flexiblen Einsatz von Software, insbesondere in Edge-Szenarien. Ergänzend wurden verwandte digitale Mobilitätsdiensteplattformen analysiert, um von deren Ansätzen zu lernen.

Der zweite Teil des Berichts widmete sich den Rahmenbedingungen. Hierbei wurden die entscheidenden rechtlichen Rahmenbedingungen (wie eIDAS, Data Act, Data Governance Act und Wettbewerbsrecht), der Stand aktueller Automobiltechnologien (z.B. Software Defined Vehicle, In-Car-Plattformen) sowie die Abgrenzung zu und Synergien mit verwandten Projekten (z.B. Catena-X, Datenraum Mobilität und andere Gaia-X-Projekte) dargelegt.

Wesentliche Schlussfolgerung des Berichts zu E2.1.1 war die Schaffung eines gemeinsamen Verständnisses der komplexen technologischen und regulatorischen Ausgangslage. Er identifizierte die Kerntechnologien und die externen Faktoren, die bei der Konzeption der Systemarchitektur in AP 2.3 berücksichtigt werden sollten und diente als direkte Vorbereitung für die detaillierte Technologiebewertung im Ergebnis E2.1.2.

Ergebnis E2.1.2: Bewertung von Technologien, Implementierungen und Mobilitätslösungen als Input für AP2.3

Das Ergebnis E2.1.2 baute direkt auf der Analyse aus E2.1.1 auf. Ziel dieser Evaluation war die detaillierte Bewertung und Auswahl spezifischer Technologien und Software-Implementierungen, um die in AP 2.3 entworfene Systemarchitektur von moveID zu instanziieren.

Der Bericht untersucht ein breites Spektrum an Technologiefeldern anhand definierter Evaluationskriterien. Zu den zentralen evaluierten Bereichen gehören:

- **Electronic Payment Technologies:** Insbesondere regulierte Stablecoins wie EUROe.
- **Distributed-Ledger Technologies (DLT):** Analyse von Layer-1- und Layer-2-Lösungen wie z.B. Polygon und peaq.
- **Identity Management Technologies:** Eine tiefe Evaluation von SSI-Softwarestacks (z.B. walt.id), Wallets und DID-Methoden (z.B. DID:WEB).
- **Data Space Technologies:** Bewertung von Gaia-X-konformen Datenraum-Komponenten wie dem Eclipse Dataspace Connector (EDC), Pontus-X und XFSC.
- **Use Case Technologies:** Analyse von Protokollen für spezifische Anwendungsfälle, wie **OCPP** für das Laden von E-Fahrzeugen.
- **Weitere Technologien:** Bewertung von Container-Technologien für Edge-Geräte (z.B. Kubernetes-Varianten), Software Agents (z.B. Fetch agents) und Kommunikationsprotokollen (V2X/SSI).

51nodes brachte hierbei eigene Evaluationsergebnisse ein, insbesondere zur Analyse der SSI-Lösungen von walt.id. Die wesentliche Schlussfolgerung des Berichts war ein Satz konkreter **Technologie-Empfehlungen** für die Umsetzung der moveID-Demonstratoren, insbesondere für die Messe IAA 2023. Um schnell handlungsfähig zu sein und die Gaia-X-Konformität zu gewährleisten, stützte sich moveID auf die reifsten verfügbaren Stacks: **DID:WEB** für die Identitätsauflösung, das **Pontus-X-Ökosystem** für die Data-Space-Dienste, **EUROe** für die Zahlungsabwicklung und das **walt.id SSI-Kit** für die Integration des Identitäts-Ökosystems.

Als Herausforderungen für die weitere Projektlaufzeit wurden die Offline-fähige und V2X-basierte Präsentation und Nutzung von Credentials sowie allgemein die Integration von ressourcen-beschränkten Edge-Geräten identifiziert.

Detaillierte Ausführungen zu den Technologieevaluationsergebnissen und für die Systemarchitektur von moveID ausgewählten Technologien enthält Kapitel 1 dieses Schlussberichts.

Weiterhin, da es ein wichtiges Ergebnis der Technologieanalyse und -evaluation von 51nodes aus dem Bereich SSI ist, liefert die nachfolgende Tabelle aus der Projektarbeit einen Vergleich bedeutender SSI-Frameworks.

	Hyperledger Identus	**walt id**	**Veramo**	**Sphereon**
Beschreibung	Identitätssuite (Agenten, SDKs und Dienste) zum Ausstellen, Halten und Überprüfen von W3C Verifiable Credentials und DIDs.	Open-Source-Identitätsinfrastruktur, die Wallet- (Custodial), Issuer- und Verifier-APIs mit Unterstützung für DIDs, VCs und OIDC4VC-Flows bietet.	Framework mit einer steckbaren Architektur zur Erstellung und Verwaltung von DIDs, Verifiable Credentials und sicherem Messaging in JavaScript-Anwendungen.	Anbieter von SDKs und Cloud-Diensten zum Erstellen von Lösungen für Verifiable Credentials und digitale Identitäten über offene Standards (DIDs/VCs/OIDC4VC) hinweg.
Open Source	Ja	Ja (Teilweise)	Ja	Ja (Teilweise)
Sprache	TypeScript SDK, Swift SDK, Kotlin (KMP), Cloud Agent in Scala	Kotlin/Java, JavaScript	Typescript	TypeScript, Kotlin
Kommunikationsprotokolle	DIDComm v2, OID4VC/OID4VP	OID4VC/OID4VP, SIOPv2 + Presentation Exchange	DIDComm v2, OID4VC/OID4VP	OID4VC/OID4VP, Nahkommunikation (BLE, NFC)
Dokumentationsqualität	Gut	Gut	Sehr Gut	Gut
DID-Methoden	did:prism	did:key, did:jwk, did:web, did:cheqd	did:ethr, did:web, did:key; did:cheqd und andere über Community-Plugin(s)	Mehrere über Provider (z. B. Veramo)
Gaia-X-Integration	Nein	Nein	Nein	Nein
Edge-Fähigkeiten	Ja	Nein	Nein	Nein

Formate für Verifiable Credentials	JWT-VC, Anon-Creds	JWT-VC, SD-JWT VC, JSON-LD	JWT-VC, JSON-LD	JWT-VC, SD-JWT VC, JSON-LD
Letzte Aktivität (<3M)	Ja	Ja	Nein	Ja
Link	https://hyperledger-identus.github.io/docs/	https://walt.id/	https://veramo.io/	https://sphereon.com/

Tabelle 4: Analyse von SSI-Frameworks (Autor: Julian Voelkel, 51nodes; Stand 2025-09)

Und 51nodes stellte einen Vergleich bedeutender SSI-Demonstratoren im Umfeld der eigenen Projektfamilie an, um mögliche Eingaben für eine eigene Umsetzung zu gewinnen.

	Aster-X	**Gaia-X 4 ROMS**	**Atlas-X Gateway**
Beschreibung	Autorisierungsmanagement beim Datenverbrauch.	Veröffentlichung von EDC-Angeboten im GXDCH- und XFSC-Katalog.	Das Atlas-X Gateway zeigt, wie die Atlas-X-Bibliothek als multifunktionales Gateway für verschiedene Gaia-X-Dienstangebote genutzt werden kann.
Open Source	Ja	Ja	Ja
Sprache	Typescript	Typescript, Java	Java
Kommunikationsprotokolle	OID4VC/OID4VP	W3C VC	W3C VC
Dokumentationsqualität	Gut	Gut	Gut
DID-Methoden	did:web	did:web	-
Gaia-X-Integration	Ja	Ja	Ja
Edge-Fähigkeiten	Nein	Nein	Nein
Formate für Verifiable Credentials	JWT-VC	JWT-VC	SD-JWT VC
Letzte Aktivität (<3M)	Nein	Nein	Nein
Link	https://gitlab.com/gaia-x/data-infrastruc-	https://github.com/Gaia-X-4-ROMS/EDC-GXDCH-Integration	https://github.com/chainstep/atlasx-gateway

	ture-federation-services/deployment-scenario		

Tabelle 5: SSI-Demonstratoren von angrenzenden Gaia-X-Projekten (Autor: Julian Voelkel, 51nodes)

2.1.1.2 AP 2.2 Schnittstelle intern zur GAIA-X AISBL Gesamtorganisation und zu externen relevanten Institutionen

Ziel (Soll) nach VHB:

- Kollaborative Erarbeitung von Übersichten und Schnittstellen
- Anwendung des Bewertungsframework für SSI-Ansätze (in Kooperation mit dem Partner ecsec)

Ergebnisse:

Zunächst erstellte 51nodes in Kooperation mit TP2-Partnern eine Liste relevanter Systeme, Projekte und Standards für potenzielle Schnittstellen. Parallel dazu erfolgte eine Analyse der Literatur zur Interoperabilität von SSI-Ansätzen. Ein zentrales Ergebnis dieser Analyse ist der Bericht zur "Übersicht, Analyse und Bewertung Interoperabilität von SSI-Ansätzen" (E2.2.1, siehe nachfolgend). 51nodes organisierte, strukturierte und verfasste die Erstfassung dieses Berichts, bevor die Weiterführung und Finalisierung an den Partner ecsec übergeben wurde. Dieser Bericht wurde später auch der Projektfamilie "Future Mobility" zur Verfügung gestellt.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf dem Aufbau von Kommunikationsstrukturen zu zentralen SSI-Stakeholdern. 51nodes organisierte den Austausch mit Akteuren wie Idunion, cheqd, danubetech, HPI, walt.id, Sphereon sowie mySaveID von msg. Die Ergebnisse dieser Diskussionen wurden dokumentiert und in ein Stakeholderverzeichnis (E2.2.2, siehe nachfolgend) überführt.

Die Erarbeitung technischer Schnittstellen fand hauptsächlich im Rahmen der Pilotimplementierung (AP2.4) für den moveID-Demonstrator im Jahr 2023 auf der IAA Mobility-Messe statt.

Ergebnis E2.2.1: Übersicht, Analyse und Bewertung Interoperabilität von SSI-Ansätzen

Für das Projekt Gaia-X 4 moveID war die Sicherstellung der Interoperabilität von Self-Sovereign-Identity (SSI)-Ansätzen ein zentrales Anliegen. Die Vision war eine einheitliche, interoperable digitale Infrastruktur für alle Teilnehmer der mobilen Smart City. Da verschiedene Anwendungsfälle wie Parken, Laden oder Zoning potenziell unterschiedliche technische Anforderungen hatten und dadurch verschiedene SSI-Technologien nutzen würden, musste Interoperabilität von Anfang an mitgedacht werden.

Die gemeinsame Analyse von 51nodes und dem Partner ecsec im Bericht E2.2.1 identifiziert zunächst auf Basis von Yildiz et al. (2022)[38] verschiedene technische Ebenen (Layer), auf denen SSI-Interoperabilitätsprobleme auftreten können:

- **Technical Trust Layer (Vertrauensschicht):** Beinhaltet die Kernkomponenten wie Dezentralisierte Identifier (DIDs) und DID-Methoden.
- **Agent Layer (Kommunikationsschicht):** Definiert die Protokolle, mit denen Holder, Issuer und Verifier kommunizieren, z.B. für die Ausstellung oder Präsentation von Nachweisen.

[38] H. Yildiz, A. Küpper, D. Thatmann, S. Göndör, and P. Herbke, 'A Tutorial on the Interoperability of Self-sovereign Identities'. arXiv, Aug. 08, 2022. Accessed: Feb. 02, 2023. [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2208.04692

- **Credential Layer (Nachweisschicht):** Betrifft die Formate der digitalen Nachweise (Verifiable Credentials) und Präsentationen.
- **Application Layer (Anwendungsschicht):** Berücksichtigt anwendungsspezifische Standards und Anwendungsfälle, z.B. für Smart Parking oder Ladeinfrastruktur.

Die ersten drei wichtigsten Dimensionen spiegeln sich auch im Interoperabilitätsmodell wider:

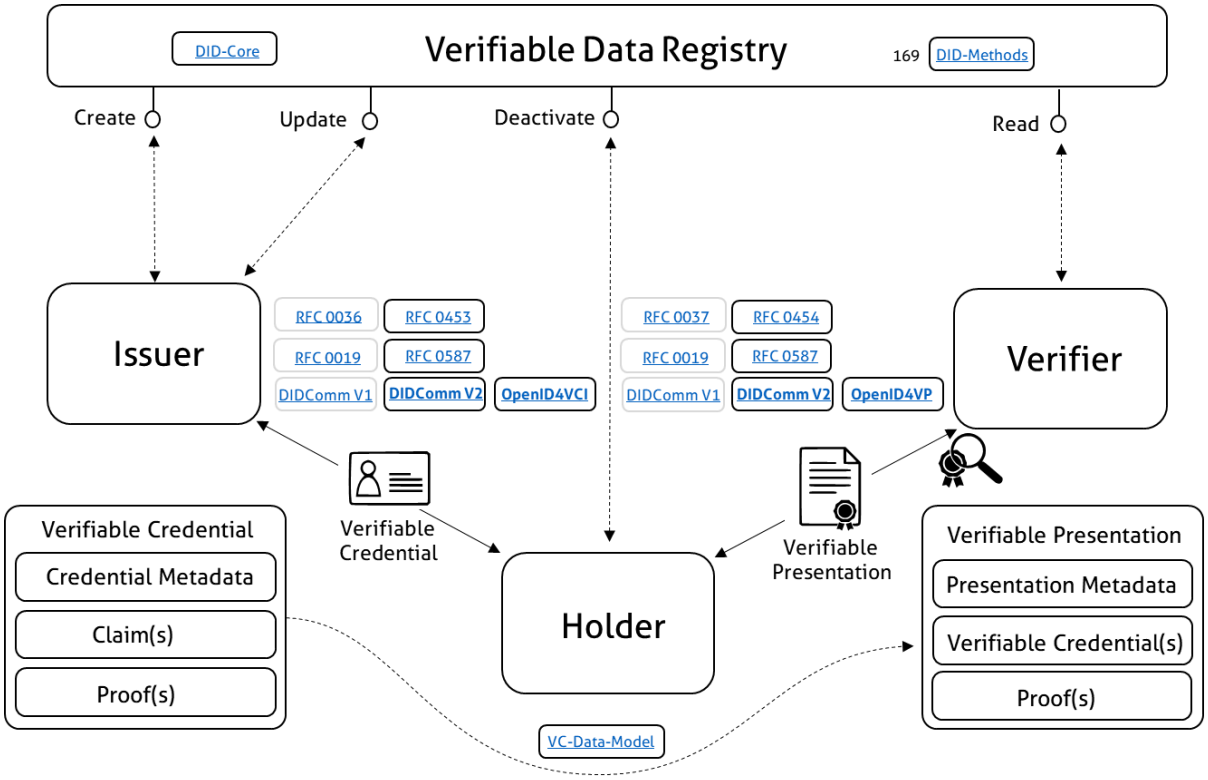


Abbildung 4: SSI-Interoperatbilitätsmodell (Autor: Dr. Detlef Hühnlein, ecsec GmbH, aufbauend auf einer Darstellung von Longley et al. in https://www.w3.org/TR/vc-data-model-1.1/) zeigt 3 wesentliche Dimensionen der Interoperabilität: (1) DID-Methoden, (2) Das Verifiable Credential Data Model und (3) Die Protokolle zum Ausstellen und Präsentieren von Verifiable Credentials

Wesentliche Ergebnisse der Analyse in den drei wichtigsten Interoperabilitätsdimensionen sind

1. Es existierte eine sehr **hohe Anzahl an DID-Methoden** (169 im Juni 2023). Obwohl eine Umfrage von 2022 ergab, dass did:indy und did:sov (beide aus dem Hyperledger-Stack) dominierten, war die Landschaft stark fragmentiert.
2. Das **W3C Verifiable Credentials Data Model**[39] hatte sich als dominanter Standard für digitale Nachweise etabliert. Es erlaubte jedoch unterschiedliche kryptografische Umsetzungen (z.B. JSON-LD oder JWT-basiert), was ebenfalls zu Interoperabilitätsproblemen führen konnte.

[39] https://www.w3.org/TR/vc-data-model-1.1/

3. **Bei den SSI-Protokollen** zeigte sich, dass DIDComm V1 stark an den Hyperledger Indy Stack gebunden war, DIDComm V2[40] aber "DID-Methoden-agnostisch" sei. Parallel dazu gewannen OpenID Connect-basierte Protokolle (OpenID4VCI zur Ausstellung und OpenID4VP zur Präsentation) stark an Bedeutung. Diese wurden auch im "European Digital Identity Wallet Architecture and Reference Framework"[41] (ARF) vorgesehen.

Vor diesem Hintergrund wurden drei praktische Strategien zur Erreichung von Interoperabilität detailliert analysiert:

1. Nutzung des meistverbreiteten Software-Stacks

Diese Strategie setzt darauf, sich auf die zu einem Zeitpunkt dominanteste Technologie zu konzentrieren, um automatisch mit einem Großteil der bestehenden Akteure kompatibel zu sein. Basierend auf Daten von 2022 wäre dies der Hyperledger-Stack gewesen. Der Nachteil wäre die starke Bindung an ein spezifisches Ökosystem.

2. Ausrichtung auf konvergierende Standards

Diese Strategie fokussiert auf die Standards, die sich in der Industrie und in den Standardisierungsgremien (wie W3C oder DIF) durchsetzen und zu konvergieren versprechen. Hier ist die Kombination aus dem W3C Verifiable Credential Data Model[42] und dem weit verbreiteten OpenID Connect-Protokoll-Stack[43,44] zu nennen. Auch seinerzeit neue Standards wie "Selective Disclosure for JWTs"[45] (SD-JWT), die selektive Datenoffenlegung für Nachweise ermöglichen, wurden betrachtet.

3. Einsatz von Brokern oder Übersetzungs-Middleware

Als Brückentechnologie könnten Übersetzungsmiddlewares helfen, um existierende, inkompatible Systeme zu verbinden. Der im Bericht analysierte ATIB (Attribute Trust-enhancing Identity Broker[46]) kann als Vermittler agieren zwischen verschiedenen SSI-Technologien und auch zwischen Protokollen (SAML, OpenID Connect) übersetzen.

---

[40] https://identity.foundation/didcomm-messaging/spec/v2.0/

[41] https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/european-digital-identity-wallet-architecture-and-reference-framework

[42] https://www.w3.org/TR/vc-data-model-1.1/

[43] https://openid.net/specs/openid-4-verifiable-credential-issuance-1_0.html

[44] https://openid.net/specs/openid-4-verifiable-presentations-1_0.html

[45] https://www.ietf.org/archive/id/draft-fett-selective-disclosure-jwt-00.html

[46] A. Gruner, A. Muhle, and C. Meinel, 'ATIB: Design and Evaluation of an Architecture for Brokered Self-Sovereign Identity Integration and Trust-Enhancing Attribute Aggregation for Service Provider', *IEEE Access*, vol. 9, pp. 138553–138570, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116095.

Ein spezielles Beispiel ist der "Universal Resolver"[47], der es einem Verifizierer ermöglicht, DIDs aus verschiedensten Methoden aufzulösen, ohne jede Methode selbst implementieren zu müssen. Ein ähnlicher Ansatz existiert mit dem "Universal Registrar" für die Erstellung von DIDs.

Die zentrale Schlussfolgerung des Berichts ist die Empfehlung, sich konsequent an die konvergierenden Standards zu halten, um nachhaltige Interoperabilität zu gewährleisten.

Für das moveID-Projekt wurde daher empfohlen:

1. Die Nutzung des **W3C Verifiable Credential Data Model**[48] und der **DID Core Spezifikation**[49] als Basis.
2. Für die Kommunikationsprotokolle die Implementierung von **DIDComm V2**[50] oder der **OpenID Connect-basierten Protokolle**[51,52]
3. Um die Handhabung der fragmentierten DID-Methoden-Landschaft zu bewältigen, sollten Implementierungen (insbesondere auf Verifizierer-Seite) auf treiberbasierte Architekturen setzen, wie sie der **"Universal Resolver"**[53] bereitstellt.

Ergebnis E2.2.2: Einrichtung von Informations- und Kommunikationsstrukturen zu relevanten SSI-Stakeholdern

51nodes organisierte Informations- und Kommunikationsstrukturen unter Mitwirkung der Partner zum Austausch mit den folgenden SSI-Stakeholdern im Laufe des Projektes (siehe auch Kapitel 1.5).

- **IDunion**[54]**:** Es wurden das Onboarding und die Nutzung des SSI-Netzwerks IDunion erörtert.
- **Danube-tech**[55]**:** Entwickelt(e) Open-Source-SSI-Interoperabilitätslösungen (z. B. den universellen DID-Resolver) und betreibt die gehostete Plattform GoDiddy.
- **Cheqd**[56]**:** Bietet ein SSI-Netzwerk mit Vorteilen wie niedrigen Transaktionsgebühren, Produktionsreife und kostenpflichtigen Diensten. Die Transaktionskosten waren durch das Hosten eines eigenen Cheqd-Knotens reduzierbar.
- **Sphereon**[57]**:** Bietet ein SSI SDK, das hohe Standards und Qualität versprach.

---

[47] https://github.com/decentralized-identity/universal-resolver

[48] https://www.w3.org/TR/vc-data-model-1.1/

[49] https://www.w3.org/TR/did-1.0/

[50] https://identity.foundation/didcomm-messaging/spec/v2.0/

[51] https://openid.net/specs/openid-4-verifiable-credential-issuance-1_0.html

[52] https://openid.net/specs/openid-4-verifiable-presentations-1_0.html

[53] https://github.com/decentralized-identity/universal-resolver

[54] https://idunion.org

[55] https://danubetech.com/

[56] https://cheqd.io/

[57] https://sphereon.com/

- **Walt.id[58]:** Stellt Open-Source-SSI-Software-Entwicklungskits bereit. moveID verwendete walt.id SSI-Kit und Wallet-Kit für die IAA 2023-Demo „Parken und Laden“ (siehe AP2.4).
- **ATIB:** Ein Vertreter des Hasso-Plattner-Instituts erläuterte den „*Attribute Trust-enhancing Identity Broker*“[59] - einen Broker-Ansatz für SSI-Interoperabilität auf der Dienstanbieterseite, der Backend-Brücken zu SSI-Identitäten und -Netzwerken schlägt.
- **mySaveID[60]:** mySaveID kam als qualifizierter Vertrauensdiensteanbieter für moveID in Betracht, der mit eIDAS 2.0 und GAIA-X kompatibel war. Eine Diskussion zur Nutzung für vertrauenswürdige Identitäten und Anmeldeinformationen für Unternehmen (bis hin zu Mitarbeitern, Flotten, Autos) war angedacht.

[58] https://walt.id/

[59] A. Gruner, A. Muhle, and C. Meinel, ‘ATIB: Design and Evaluation of an Architecture for Brokered Self-Sovereign Identity Integration and Trust-Enhancing Attribute Aggregation for Service Provider’, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 138553–138570, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116095.

[60] https://www.msg.group/de/press/msg-treibt-mysaveid-von-targens-weiter-voran

2.1.1.3 AP 2.3 Technische Systemarchitektur

Ziel (Soll) nach VHB:

- Entwicklung des technisch-ökonomisches Zielszenarios
- Abstimmung der Integration von Blockchain Technologien
- Verantwortlich für kollaborative Erarbeitung der Systemarchitektur auf Basis des Anforderungskatalogs
- Vorbereitung von weiterführenden Use-Cases

Ergebnisse:

Im Arbeitspaket 2.3 des Projekts Gaia-X 4 moveID hat 51nodes maßgeblich zur Entwicklung und Finalisierung zentraler Ergebnisse beigetragen.

1. ***AP2.3 Ergebnis: Technisch-ökonomisches Zielszenario***

Das erste Ergebnis im AP2.3 war das technisch-ökonomische Zielszenario (E2.3.1). Dieses liegt als grafische Darstellung (siehe Abbildung 1) und als finaler Bericht (kombiniert technisch-ökonomisch) vor, der unter Anleitung von 51nodes und mit Beiträgen von 51nodes und Partnern erstellt wurde.

Ein wesentliches Ergebnis der Arbeit von 51nodes zum technisch-ökonomischen Zielszenario ist die Etablierung eines ökonomischen Verständnisses, das die technische Systemarchitektur (aus E2.3.3) ergänzt und validiert.

Der Bericht E2.3.1 gliedert des moveID-Ökosystems der moveID-Plattform entlang den Schichten eines **Netzwerk-Schichtenmodells**: Infrastrukturschicht, Transaktionsschicht und Anwendungsschicht (siehe Abbildung 5). Der Logik des Modells folgend, müssen auf allen drei Ebenen funktionierende Geschäftsmodelle möglich sein, um die moveID-Plattform für datengetriebene Mobilitätsdienste insgesamt zum ökonomischen Gelingen zu verhelfen.

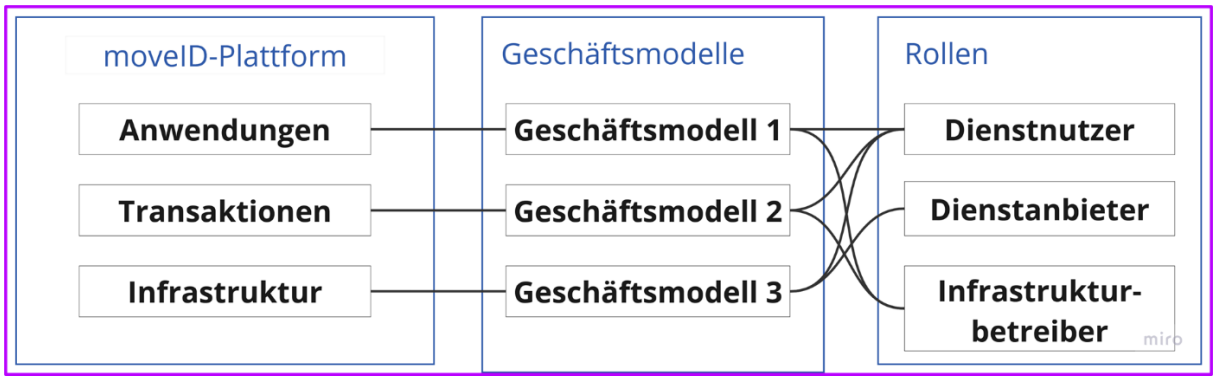


Abbildung 5: Um das wirtschaftliche Potenzial der moveID-Plattform darzustellen, haben wir Geschäftsmodell für alle Ebenen und Anreize für alle Rollen konzipiert (Autoren: Jochen Kaßberger und Dr. Achim Klein, 51nodes)

Die zentrale Methodik zur Analyse der Geschäftspotenziale auf den drei Ebenen war der **Business Model Canvas (BMC)**, ein Ansatz zur ganzheitlichen Erfassung und Darstellung der

neun wichtigsten Bausteine eines Geschäftsmodells. Als Auszug, um die Tragfähigkeit der moveID-Plattform selbst zu analysieren, wurde ein BMC für den **"moveID Infrastructure Operator / Federator"** entwickelt. Darin wird die moveID-Infrastruktur als ein zweiseitiger Markt beschrieben.

- Die **Kundensegmente** sind dabei auf der einen Seite Mobilitäts-App-Anbieter und Diensteanbieter (z.B. Parkhausbetreiber) und auf der anderen Seite die Endnutzer bzw. Verkehrsteilnehmer.
- Das zentrale **Wertversprechen (Value Proposition)** für Anbieter ist die Möglichkeit, ihre Dienste diskriminierungsfrei auf einer dezentralen Infrastruktur anzubieten und dabei potenziell ein globales Publikum zu erreichen. Für Nutzer besteht der Wert in der sicheren, vertrauenswürdigen Interaktion und dem einfachen, nahtlosen Onboarding über eine Self-Sovereign Identity (SSI) für eine Vielzahl von Diensten.
- Die **Erlösquellen** für den Plattformbetreiber (Federator) setzen sich aus verschiedenen Quellen zusammen, darunter Provisionen für Partnerdienste, Transaktionskosten bei der Buchung von Services oder Abonnementgebühren für die Dienstanbieter.
- Die **Kostenstruktur** umfasst primär das Hosting, Internet- und Energiekosten sowie die Personalkosten für ein Team, das die Plattform weiterentwickelt und betreibt.

In der finalen Aktualisierung des Berichts E2.3.1 aus dem Jahr 2025 wurde der BMC-Ansatz genutzt, um für vier spezifische Anwendungsfälle des Projekts (Zoning, Smart Parking, Road Condition Monitoring, Data Provenance) Geschäftsmodellansätze auf der Anwendungsebene auszuarbeiten (siehe Abbildung 6 als Beispiel).

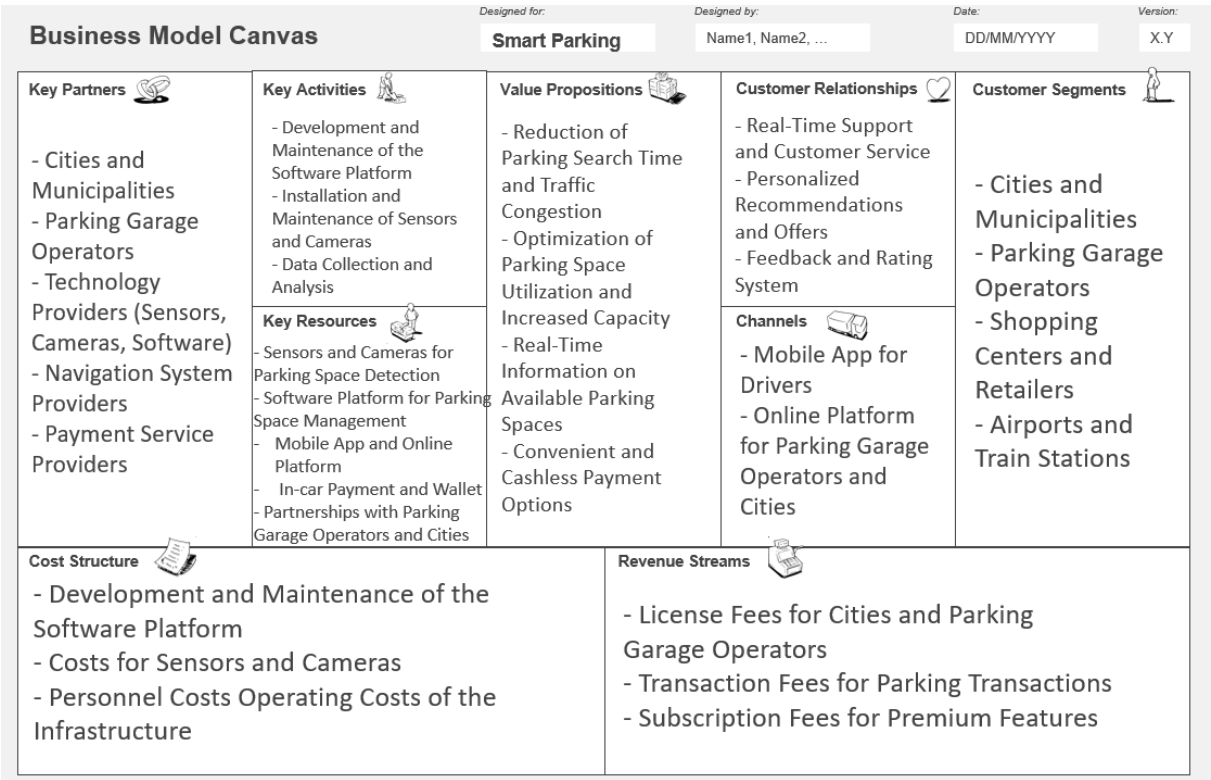


Abbildung 6: Geschäftsmodellentwurf für den moveID-Anwendungsfall „Smart Parking" (Autoren: moveID-Konsortium)

2. AP2.3 Ergebnis: Technische Systemarchitektur

Im Rahmen des Projekts Gaia-X 4 moveID war die zentrale Aufgabe die Entwicklung einer robusten und zukunftsfähigen Systemarchitektur für ein digitales, dezentralisiertes Mobilitätsdienste-Ökosystem. 51nodes stellte die Grundlagen bereit, darunter das Vorgehensmodell, die Werkzeuge und die Dokumentationsstruktur nach arc42[61]. 51nodes entwickelte gemeinsam mit Partnern die erste Version der Grob-Systemarchitektur und entwarf Standardprozesse für Mobilitätsdienste, wie beispielsweise die Ausstellung und Überprüfung von digitalen Nachweisen.

Die zweite, aktualisierte Version der Systemarchitektur (E2.3.3) wurde maßgeblich vom Partner Bosch vorangetrieben unter Mitwirkung von 51nodes und anderer Partner. Die Architektur dokumentiert die wesentlichen Design-Entscheidungen. Die Architektur basiert auf fundamentalen Design-Zielen, die Interoperabilität, Dezentralisierung und Nutzerkontrolle über eigene Daten in den Mittelpunkt stellen. Als maßgebliche Leitplanken wurden die Spezifikationen der Gaia-X-Architektur (insbesondere das Trust Framework und die Federation Services) sowie die Anforderungen der Use Cases (z.B. Smart Parking, Zoning, Vehicle Data Collection) definiert. Eine entscheidende technische Vorgabe war die konsequente Nutzung von dezentralen Identitäten (W3C DIDs und Verifiable Credentials).

Die technische Systemarchitektur diente als wichtiger Katalysator für andere Arbeiten im Projektkonsortium. Die Architektur wurde bewusst hersteller- und technologieunabhängig konzipiert, um zu einem offenen, interoperablen Ökosystems beizutragen.

Die drei-schichtige Architektur

Als zentrale Lösungsstrategie wurde eine drei-schichtige Architektur festgelegt, um eine klare Trennung der Verantwortlichkeiten zu ermöglichen (siehe Abbildung 7).

Die unterste Schicht bildet die **externe Basisinfrastruktur**. Diese Schicht stellt die grundlegenden föderierten Dienste und Vertrauensanker bereit, auf denen moveID aufbaut, darunter die Gaia-X Federation Services, SSI-Netzwerke (zur Verwaltung von DIDs) und Distributed Ledger Technologies (DLTs).

Die oberste Schicht umfasst die eigentlichen Endanwendungen für Nutzer, wie etwa eine "Smart Parking App" oder eine "Zoning"-Anwendung, die die moveID-Funktionen nutzen.

Das Kernstück der Architektur bildet die mittlere Schicht, die **moveID Ecosystem Capabilities**. Diese Schicht stellt die gesamte domänenspezifische Logik für den Mobilitätsdatenraum bereit und fungiert als Zwischenschicht zwischen der Basisinfrastruktur und den Endanwendungen.

[61] https://arc42.org/

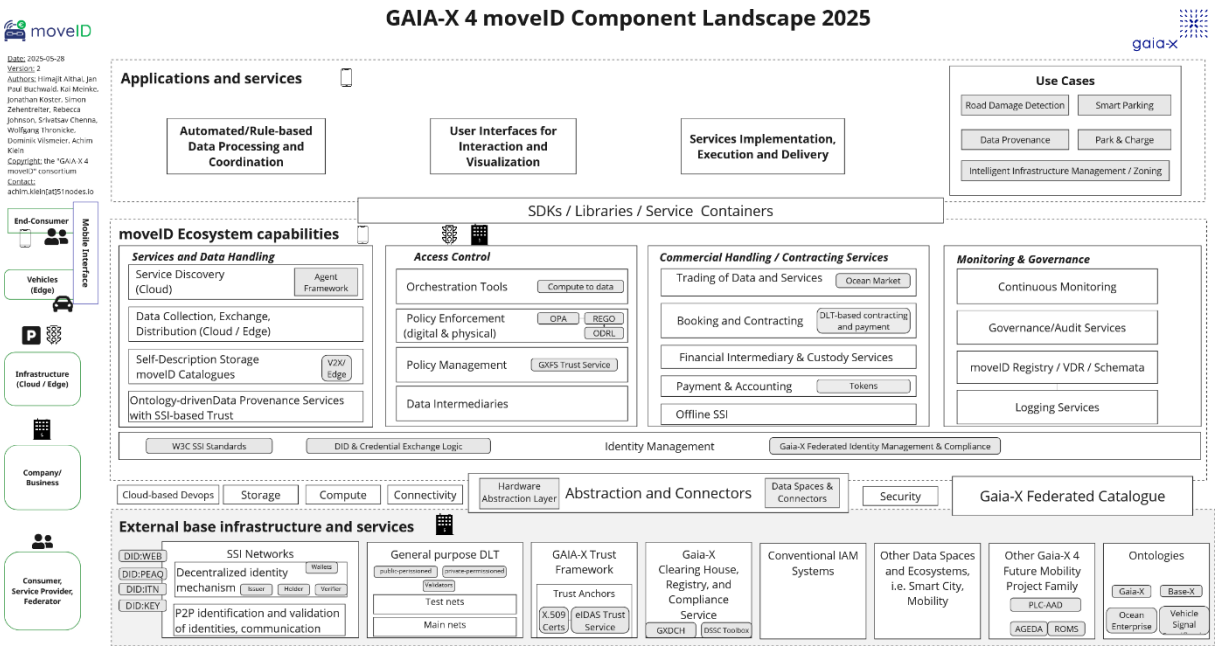


Abbildung 7: Die Gaia-X 4 moveID Systemarchitektur in der aktualisierten Fassung von 2025 besteht aus drei Schichten und zeigt wesentliche Komponenten in allen Bereichen (Autoren: Jan-Paul Buchwald, 51nodes und das moveID-Konsortium)

Die Ökosystemfähigkeiten, zu deren Entwurf 51nodes wesentliche Beiträge lieferte, gliedern sich in vier Hauptblöcke:

Der Baustein **"Services and Data Handling"** ist für die Registrierung, den Austausch, die Entdeckung (Discovery) und die Herkunftsnachweise (Provenance) von Daten und Diensten innerhalb des dezentralen Mobilitätsdienste-Ökosystems von moveID verantwortlich. Er dient als Fundament, das Interoperabilität, Vertrauen und Compliance zwischen den verschiedenen Anbietern, Verbrauchern und Regulierungsbehörden ermöglichen soll. Die Registrierung und Entdeckung von Diensten ist stark von Gaia-X und den GXFS beeinflusst, insbesondere im Hinblick auf Selbstbeschreibungen (Self-Descriptions) und deren Verknüpfung mit SSI. Für den reinen Datenaustausch (Data Collection and Exchange) bietet die Architektur eher Richtlinien als starre Vorgaben, da Anwendungsfälle Daten oft auf P2P-Basis austauschen.

Der Baustein **"Access Control"** basiert auf einem ABAC-Ansatz (Attribute-Based Access Control), der auf Verifiable Credentials (VCs) und Presentations aufbaut. Diese Zugangskontrolle wird durch Richtlinien in einer Cloud-Komponente verwaltet und zwischen den anfragenden Modulen (Cloud, Edge, Frontend) und den gewährenden Zugriffsmodulen durchgesetzt. Die Zugangskontrolle kann Technologien wie Open Policy Agent (OPA) nutzen und sich auf die "GAIA-X trust service API" stützen.

Der Baustein **"Commercial Handling / Contracting Services"** stellt die Geschäftslogik für Transaktionen, Verträge und finanzielle Operationen im moveID-Ökosystem bereit. Er ermöglicht vertrauenswürdige, automatisierte und prüfbare Interaktionen, um sicherzustellen, dass Dienste konform und transparent gebucht, bezahlt und abgerechnet werden können. Zu den technischen Umsetzungsüberlegungen gehören hier Mechanismen für Token-Swaps zwischen verschiedenen Netzwerken, regelkonforme Fiat-Onramps (z.B. für Kreditkartenzahlungen) und der Einsatz von Softwareagenten zur Automatisierung von Zahlungen.

Der Bereich **"Monitoring & Governance"** ist dafür verantwortlich, sicherzustellen, dass alle Dienste und Datenflüsse innerhalb des dezentralen Ökosystems transparent, prüfbar und konform mit den Gaia-X-Prinzipien sind. Diese Komponente schafft die Grundlage für Vertrauen, Rechenschaftspflicht und kontinuierliche Verbesserung, indem sie es Stakeholdern wie Anbietern, Nutzern und Regulierungsbehörden ermöglicht, zu prüfen, dass das die moveID-Plattform gemäß den vereinbarten Regeln arbeitet.

Die Komponentenlandschaft, als zentraler Teil der beschriebenen Systemarchitektur, wurde von 51nodes im Blog des Projekts veröffentlicht: https://moveid.org/2023/01/31/gaia-x-project-moveid-releases-component-landscape/.

Wesentliche Erweiterungen der finalen Architektur

Die finale Version der Systemarchitektur (Stand September 2025) führte durch den Beitrag von Projektpartnern zwei Neuerungen ein, die zu der Praxistauglichkeit im Mobilitätssektor beitragen können.

Erstens, die **Ontology-driven Data Provenance**. Dieser Mechanismus dient der Sicherstellung von nachvollziehbarem Datenvertrauen (verifiable data trust). Dabei werden Herkunftsnachweise und Metadaten zur Abstammung untrennbar mit den Datensätzen verbunden.

Zweitens, als Antwort auf die Anforderung nach Konnektivitätsunabhängigkeit ermöglicht **„Offline SSI“** sichere Interaktionen und die Verifizierung von Credentials direkt "on the Edge", selbst wenn keine Verbindung zum Internet oder zu einer Blockchain besteht. Technisch wird dies durch eine zwischengespeicherte Kopie der relevanten Identitätsdokumente (insbesondere der Public Keys) von vertrauenswürdigen Ausstellern (z.B. OEMs oder Behörden) ermöglicht.

Die Erweiterungen der Systemarchitektur wurden von 51nodes im Blog des Projekts veröffentlicht: https://moveid.org/2025/09/15/moveid-component-landscape-evolves-introducing-data-provenance-and-offline-ssi/

Die moveID SDKs dienen der Umsetzung der Architektur

Für die Realisierung wurde die Architektur in drei spezifische **Software Development Kits (SDKs)** aufgeteilt, die unterschiedliche technische Einsatzumgebungen adressieren.

Das **moveID Cloud SDK** stellt die Backend-Funktionen für Cloud-Dienste bereit. Es ist für den Betrieb in Rechenzentren ausgelegt und umfasst die zentralen Verwaltungsmodule: Dazu gehören das Identitätsmanagement (für das Onboarding von Organisationen und die Ausstellung von Credentials), das Servicemanagement (für die Registrierung und das Auffinden von Diensten im Gaia-X Federated Catalogue), das Zugriffsmanagement (zur Definition von Policies), das Datenmanagement sowie die Module für Contracting und Zahlungsabwicklung.

Das **moveID Edge SDK** ist gedacht für die Integration in Fahrzeuge und dezentrale Infrastruktur (z.B. Ladesäulen, Parkhäuser). Es ist speziell für Umgebungen mit begrenzten Ressourcen und potenziell unterbrochener Konnektivität ausgerichtet. Es fokussiert auf die lokale Identitätsverwaltung (das Halten und Präsentieren von VCs), die lokale Service Discovery (das Erkennen von Diensten in der unmittelbaren Umgebung) und die unmittelbare Durchsetzung der Zugriffskontrolle (Access Control Enforcement) direkt am Interaktionspunkt.

Ergänzend dient das **moveID Frontend SDK** der Anbindung von Endnutzer-Anwendungen, typischerweise mobilen Apps oder digitalen Wallets. Es stellt die notwendigen Module bereit, damit Nutzer ihre digitalen Identitäten verwalten, Authentifizierungen durchführen und Zahlungsvorgänge auf ihrem persönlichen Gerät autorisieren können.

3. AP2.3 Ergebnis: Technisch-ökonomische Netzwerkkomponenten

Zum Bericht zur "Definition technischer und ökonomischer Netzwerkkomponenten" (E2.3.4) leistete 51nodes wesentliche inhaltliche Beiträge, insbesondere durch die Initiierung und Ausarbeitung von Prozessentwürfen für die Nutzung und Bereitstellung von Mobilitätsdiensten. Der Bericht schlägt eine Brücke zwischen der Systemarchitektur (E2.3.3) und den Geschäftsmodellen (E2.3.1).

Die technischen und ökonomischen Netzwerkkomponenten für das moveID-Ökosystem wurden definiert als: Die **ökonomischen Komponenten** sind die aufeinanderfolgenden Schritte eines generischen "Mobile Commerce Process", den Endanwender bei der Nutzung von Mobilitätsdiensten auf der moveID-Plattform durchlaufen würden. Die **technischen Komponenten** sind die zugrundeliegenden Systeme, Rollen und Infrastrukturen, die zur Durchführung dieser Prozessschritte erforderlich wären.

Die entwickelten Prozesse mussten generisch genug sein, um für verschiedenste Mobilitätsdienste (wie Parken, Laden oder Zoning) zu gelten. Gleichzeitig mussten sie die spezifischen Merkmale von moveID abbilden, wie die dezentrale Natur und die Nutzung von Self-Sovereign Identities (SSI). Der Bericht stellt fest, dass die Prozesslandschaft des moveID-Ökosystems hochkomplex ist und fokussiert sich daher bewusst auf die drei wichtigsten Kernprozesse.

Die drei zentralen moveID-Prozesse

Der Bericht definiert und visualisiert drei Hauptprozesse, die das Funktionieren des Ökosystems aus unterschiedlichen Perspektiven beleuchten:

1. Der B2B-Prozess: Dieser Prozess beschreibt die Anbieter-Perspektive für Mobilitätsdienste, beispielhaft dargestellt am Anwendungsfall "Vehicle Data Collection for Road Condition Monitoring". Der Prozess zeigt die komplexen Interaktionen, die notwendig sind, damit ein Dienstanbieter – von Flottenbetreibern über Cloud Provider bis hin zu Identitätsanbietern – einen datenbasierten Dienst im moveID-Ökosystem regelkonform anbieten, abrechnen und verwalten kann.

2. Der B2C Mobile Commerce Process: Dies ist der zentrale generische Prozess, der die Interaktion eines Endnutzers (B2C) mit einem beliebigen moveID-Dienst abbildet. 51nodes war maßgeblich an der Definition dieser "Customer Journey" beteiligt, die als Abfolge von sieben wesentlichen ökonomischen Phasen definiert wurde:

1. **Onboarding:** Der Nutzer lädt die App herunter und erhält seine digitale Identität (Wallet).
2. **Discovery of Services:** Der Nutzer findet über einen Katalog (Registry) den gewünschten Dienst (z.B. eine Ladesäule).

3. **Booking:** Der Nutzer reserviert den Dienst, woraufhin ein "Verifiable Credential" (ein digitaler Berechtigungsnachweis) ausgestellt wird.
4. **Access Control:** Der Nutzer fährt zum Dienst (z.B. Parkhaus) und weist sich dort mit seinem Credential aus, um Zugang zu erhalten.
5. **Consumption:** Der Nutzer nutzt den Dienst (das Auto lädt).
6. **Payment:** Der Zahlungsprozess wird initiiert.
7. **Settlement:** Die Transaktion wird final abgerechnet und verbucht.

Für jede dieser Phasen wurden die notwendigen technischen Rollen (wie Identity Provider, Payment Provider, Mobility Infrastructure Provider) zugeordnet (siehe Abbildung 8).

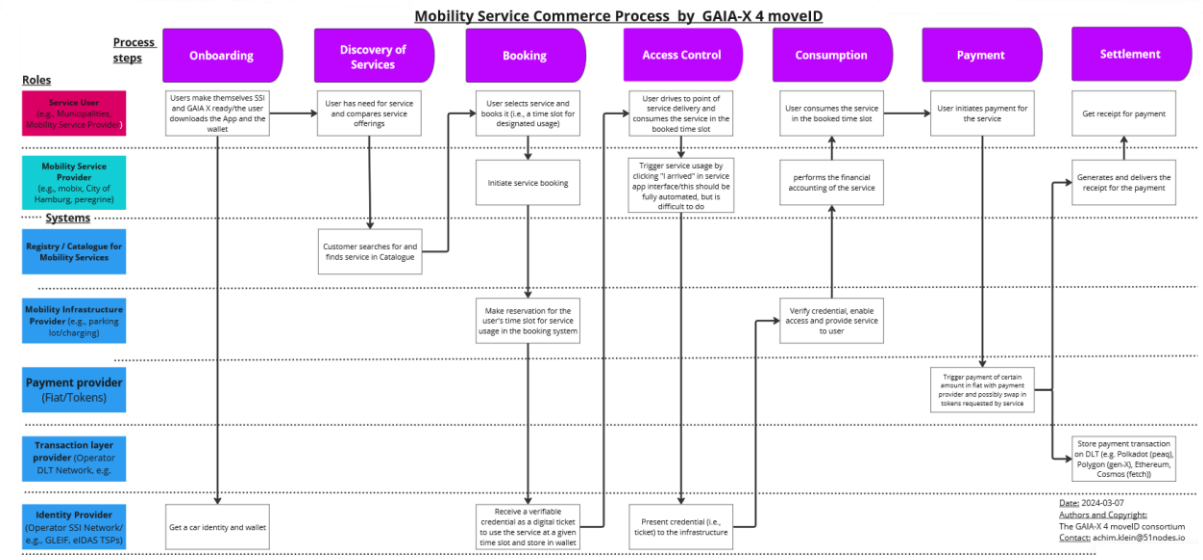


Abbildung 8: Der Mobile Commerce Process zeigt die wesentlichen Rollen, IT-Systeme und Prozessschritte im avisierten moveID-Ökosystem für digitale Mobilitätsdienste (Autoren: 51nodes und Partner von moveID)

Der Mobile Commerce Process wurde von 51nodes auf dem Blog des Projekts veröffentlicht: https://moveid.org/2024/03/07/the-mobility-service-commerce-process/.

3. Der moveID Platform Operation Process: Dieser dritte Prozess, den 51nodes ebenfalls maßgeblich mitgestaltet hat, betrachtet die moveID-Plattform aus der Betreiber-Perspektive (dem "moveID Operator"). Dieser Prozess umfasst den gesamten Lebenszyklus der Plattform. Er beginnt mit der **moveID Startup-Phase** (Bootstrapping des Ökosystems) und dem Onboarding der ersten Anbieter. Besonders wichtig sind hier die Phasen **Retention** (Kundenbindung) und **Advocacy** (Weiterempfehlung). Diese Phasen betonen die Notwendigkeit, Kundenfeedback (z.B. durch den "Customer Manager") aktiv zu analysieren, um das Serviceangebot iterativ zu verbessern und das Wachstum des Ökosystems zu sichern.

Fazit und Beitrag zum Anreizsystem

Das wichtigste Lernergebnis des Berichts war die Identifikation der zentralen Prozesse, der beteiligten Akteure und der Hauptnutznießer in jedem Prozessschritt. Diese Herausarbeitung

der Wertflüsse und der kritischen Interaktionspunkte war eine wichtige Vorarbeit und diente als fundamentale Eingabe für das Anreizkonzept. 51nodes nutzte die gewonnenen Erkenntnisse aus diesem Bericht, um ein ökonomisches Modell zu entwickeln, das die Teilnahme am moveID-Ökosystem für alle Beteiligten attraktiv machen soll.

4. AP2.3 Ergebnis: Konzeption eines Anreizkonzepts für Infrastrukturteilnehmer

Die "Konzeption eines Anreizkonzepts für Infrastrukturteilnehmer" (Ergebnis E2.3.5) wurde von 51nodes initiiert, strukturiert und mit den Partnern diskutiert und vorangetrieben. 51nodes steuerte inhaltliche Beiträge zu dem Ergebnis bei.

Der Bericht adressiert eine der fundamentalsten Fragen des moveID-Projekts: Wie kann die Motivation geschaffen werden, damit Akteure einem dezentralen Ökosystem für Mobilitätsdienste beitreten und dieses aktiv nutzen?

Der Bericht stellt fest, dass für ein nachhaltiges Ökosystem drei Akteursgruppen benötigt würden: Dienstanbieter (Verkäufer), Dienstnutzer (Käufer) und die dezentrale Infrastruktur (Plattform). Während Endnutzer oft durch Gamification oder Bequemlichkeit motiviert werden können, wären geeignete Anreize für Infrastruktur- und Datenraumföderationsanbieter primär monetäre Vorteile. Der Fokus des Berichts wurde bewusst auf gewinnorientierte Stakeholder und B2B-Anreize fokussiert, anstatt auf komplexe Preismodelle oder Non-Profit-Akteure.

Analyse bestehender Systeme

Um ein effektives Anreizkonzept zu entwerfen, wurden zunächst Ansätze bestehender dezentraler Systeme analysiert:

- **Ethereum** nutzt "Gas Fees" (Pay-per-Use) und Staking-Belohnungen (Proof-of-Stake), um die Netzwerksicherheit anzureizen.
- **DePin (peaq network[62])** verwendet Tokenisierung, um den Aufbau physischer Infrastruktur (wie Automobil-Ladestationen) durch die Community zu belohnen.
- **Economy of Things von Bosch[63]** zeigt, wie Geräte (z.B. „Smart Homes“) autonom Werte wie überschüssige Energie in einem P2P-Markt handeln können.
- **Das Ocean Protocol[64]** schafft einen dezentralen Marktplatz für Daten und KI-Algorithmen. Es nutzt Token-basierte Anreize, um Transaktionen im Marktplatz zu ermöglichen und um die Nutzung von hochwertigen Daten zu fördern

Höhe der Transaktionskosten bestimmen den Wert einer Plattform

Für B2B-Anbieter und -Nutzer sind die Transaktionskosten der entscheidende Faktor. Der Bericht zieht eine formale Analyse von Strnadl (2024) heran, die besagt, dass ein Ökosystem nur

---

[62] https://www.peaq.xyz/

[63] https://www.bosch.com/de/forschung/forschungsschwerpunkte/digitalisierung-und-vernetzung/economy-of-things/

[64] https://oceanprotocol.com/build/data-marketplaces

dann stabil sei, wenn der gesamte ökonomische Wert für alle Teilnehmer positiv ist[65]. Die wichtigste Erkenntnis daraus: Je niedriger die Transaktionsgebühren (inkl. Such-, Verhandlungs- und Compliance-Kosten) für beide Seiten sind, desto höher ist der wahrgenommene Wert einer Plattform. IT-Plattform-basierte Ökosysteme wie moveID sind hier inhärent attraktiv, da sie die Transaktionskosten durch Automatisierung und Nutzung von Standards (wie Gaia-X) senken können.

Infrastruktur-Anbieter sind auf eine skalierende Plattform angewiesen

Der Fokus des Berichts liegt auf den Infrastruktur-Anbietern, die kontinuierliche Kosten für den Betrieb von SSI-Diensten, Katalogen oder Datenräumen haben. Ihre Motivation ist ebenfalls profitgetrieben, aber wie wird dieser Profit realisiert?

Hierzu wurde von einem Projektpartner ein quantitatives Experiment durchgeführt, das die Betriebskosten eines dezentralen Ökosystems simulierte. Die Ergebnisse zeigten:

1. Die Gesamtkosten steigen proportional mit der Anzahl der Nutzer, aber nicht signifikant mit der Anzahl der Anbieter.
2. Der entscheidende Faktor: Die Kosten pro Transaktion sinken exponentiell, je mehr Akteure und Transaktionen im Ökosystem stattfinden.

Der primäre Anreiz für Infrastruktur-Anbieter ist daher die Skalierung. Ihr Geschäftsmodell funktioniert nur, wenn sie aktiv die Teilnahme von möglichst vielen Anbietern *und* Konsumenten fördern, um ein hohes Transaktionsvolumen zu erreichen.

Fallstudien zu Anreizen in Plattformen

Zwei Fallstudien aus dem Konsortium zeigen unterschiedliche Ansätze für Anreize in Plattformen:

- Der Mobilitätsmarktplatz **MOBIX**[66] nutzt einen Token-Ansatz um Nutzer mit einem nativen Token (MOBX) für umweltfreundliches Verhalten (z.B. Fahrradfahren) zu belohnen. Mechanismen wie Staking und aktives Nachfragen der Belohnungen erhöhen das Nutzer-Engagement.
- Die Datenplattform **Pontus-X**[67] implementiert als Anreiz für Anbieter und Infrastrukturpartner eine automatisierte Verteilung von auf der Plattform eingenommenen Gebühren über Smart Contracts. Wenn ein Datensatz auf der Plattform in Anspruch genommen wird, wird die Nutzungsgebühr automatisch an alle Beteiligten der Wertschöpfungskette aufgeteilt: den Datenanbieter, den Softwareanbieter (Algorithmus), den Infrastrukturanbieter und den Föderationsanbieter (Portal). Dadurch werden alle Beteiligten angereizt, da sie an jeder Transaktion auf der Plattform mitverdienen.

---

[65] "A Formal Transaction Cost-Based Analysis of the Economic Feasibility of Data Spaces and Service Ecosystems", Christoph F. Strnadl (2024), https://arxiv.org/pdf/2310.03157.pdf

[66] https://mobix.ai/

[67] https://www.pontus-x.eu/

Anreize müssen sich anpassen

Der Bericht schließt damit, dass ein Anreizkonzept dynamisch sein solle. Denn, Daten, die heute wertvoll sind, können morgen zur Massenware werden, was alte Preisstrukturen kollabieren lassen würde. Daher solle das Anreizkonzept einen kontinuierlichen Prozess beinhalten, der Nutzungsmuster überwacht und Anpassungen ermöglicht.

5. AP2.3 Ergebnis: Test des Anreizkonzepts

Auf den Ergebnissen des Anreizkonzepts (E2.3.5) aufbauend konzipierte und entwickelte 51nodes unter Beteiligung der Projektpartner das Ergebnis "Test des Anreizkonzepts für Infrastrukturteilnehmer" (E2.3.6). 51nodes entwickelte einen Simulations-basierten Ansatz zur Überprüfung definierter Hypothesen über effektive Anreize. Die zentrale Fragestellung war, ob und wie Anreize die beiden kritischsten Phasen eines dezentralen moveID-Ökosystems erfolgreich unterstützen könnten: das Bootstrapping (d.h. das Hochfahren) und danach den langfristig wirtschaftlich nachhaltigen Betrieb.

Der Simulationsansatz

Um die Wirksamkeit ausgewählter Bestandteile des Anreizkonzeptes zu testen, hat 51nodes ein Agenten-basiertes Simulationsmodell für die moveID-Plattform entwickelt. Das Modell wurde mit Hilfe des Simulationsrahmenwerks Mesa[68] umgesetzt, um die Dynamik des zweiseitigen Markts der avisierten moveID-Plattform über einen simulierten Zeitraum von 365 Tagen zu beobachten. In dem Modell wurden drei wesentliche Rollen als autonome Agententypen modelliert, die zusammen die gesamte B2B2C-Wertschöpfungskette abbilden:

1. **Infrastrukturanbieter:** Die grundlegende B2B-Schicht, die digitale Ressourcen der Plattform wie Rechenleistung oder Speicher einbringt.
2. **Mobility Service Provider (MSPs):** Die B2C-Schicht, die die Endnutzer-Dienste (z.B. Park- oder Lade-Apps) erstellt und bereitstellt.
3. **Mobility Service Consumer (MSCs):** Die Endnutzer, die die Mobilitätsdienste nachfragen und die gesamte Plattformökonomie antreiben.

Phase 1: Validierung der Bootstrapping-Anreize

In der ersten Testphase konzentrierte sich 51nodes auf die Untersuchung des "Henne-Ei-Problems": Wie startet man einen zweiseitigen Markt, wenn Anbieter keine Nutzer und Nutzer keine Anbieter vorfinden? 51nodes testete primär die Hypothese, dass finanzielle Zuschüsse (Grants) die Anzahl der Dienstanbieter (MSPs) signifikant erhöhen können.

51nodes führte 1000 Simulationsläufe für zwei Szenarien durch: Ein *Kontroll-Szenario* (ohne jegliche Anreize) und ein *Szenario mit Anreiz* (mit einem definierten Budget von 1 Mio. € für Zuschüsse und Rabatte in den ersten 100 Tagen).

Die Ergebnisse bestätigten die aufgestellte Hypothese:

[68] https://mesa.readthedocs.io/

- Im *Kontroll-Szenario* kam es zu einem vollständigen Marktversagen. Ohne Anreize traten keine neuen Anbieter bei. Die Endnutzer fanden keine Dienste, ihre Zufriedenheit brach ein und sie verließen die Plattform.
- Im *Szenario mit Anreiz* waren diese erfolgreich, denn die Zuschüsse für MSPs (die B2C-Anbieter) führten zu einem schnellen Anstieg der aktiven Anbieter. Dies löste in der Simulation einen positiven Feedback-Zyklus aus: Ein reichhaltiges Angebot zog eine signifikant größere Nutzerbasis (MSCs) an.

Die Simulation zeigte im Ergebnis, dass die Anreizung der Angebotsseite (B2B) eine wirksame, indirekte Strategie ist, um die Nachfrageseite (B2C) aufzubauen. Die Simulation zeigte eine erwartete Marktkorrektur nach Tag 100 der Simulation, als die Subventionen endeten. Ein Teil der Nutzer verließ die Plattform daraufhin, der Markt stabilisierte sich jedoch auf einem Niveau, das über dem Baseline-Niveau lag und sich im restlichen Simulationsverlauf als nachhaltig erwies.

Phase 2: Validierung der Anreize für einen nachhaltigen Betrieb

In Phase 2 testete 51nodes, wie Anreize den längerfristigen wirtschaftlichen Betrieb und vor allem die Qualität des Ökosystems sichern können. Um dies realistisch zu testen, führte 51nodes das Konzept der "Cost of Quality" ein. In der Simulation mussten Infrastrukturanbieter (die B2B-Schicht) eine Entscheidung treffen: Entweder im günstigen "Standard Tier" mit mittelmäßiger Service-Qualität (z.B. 85% Uptime) zu operieren oder aktiv höhere tägliche Betriebskosten (z.B. +30%) zu investieren, um ein "Premium Tier" mit sehr hoher Qualität (bis 100% Uptime) zu erreichen. In der Simulation wurde die Frage untersucht, ob tägliche, leistungsbasierte Belohnungen die Infrastrukturanbieter dazu anreizen, kostspielige Investitionen in Premium-Qualität zu tätigen, und ob sich diese Investition für sie wirtschaftlich auszahlt.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Anreize für Infrastrukturanbieter wie erwartet wirkten:

- Im *Kontroll-Szenario* (ohne Anreize) investierte während des Simulationszeitraums von 365 Tagen kein Infrastrukturanbieter in das Premium-Tier, da es nicht wirtschaftlich gewesen wäre. Die Service-Qualität der gesamten simulierten moveID-Plattform blieb mittelmäßig, was zu einer langsam sinkenden Nutzerzufriedenheit führte.
- Im *Szenario mit Anreiz* machten die täglichen Bonuszahlungen die Investition in das Premium-Tier profitabel. Die Infrastrukturanbieter entschieden sich für die höheren Kosten, um die Infrastruktur mit höherer Qualität zu liefern.

Die höhere Qualität der Infrastruktur auf der B2B-Ebene im Simulationsszenario mit Anreiz löste eine positive Kaskade aus. Die MSPs wählten bevorzugt die Premium-Angebote der Infrastrukturanbieter, was zu einem qualitativ hochwertigeren B2C-Dienst führte, den wiederum die MSPs anboten. Das Resultat war eine signifikant höhere und stabilere Nutzerzufriedenheit und eine geringere Abwanderung der Endnutzer der Mobilitätsdienste auf der simulierten moveID-Plattform.

Mit der Simulation der Anreize in Phase 2 wurde bestätigt, dass sich die Anreizung von Investitionen in die Qualität der Infrastrukturdienste sich auszahlte. Die kumulativen Umsätze der

Infrastrukturanbieter mit Premium-Tier-Angebot waren im *Szenario mit Anreiz* bedeutend höher. Somit konnten die Anreize in der Simulation das Ziel der Profitabilität erfolgreich mit dem Ziel einer hohen Dienste-Qualität verknüpfen.

Die Simulationsarbeit von 51nodes im Ergebnis E2.3.6 lieferte zusammenfassend den Nachweis für die Wirksamkeit des entworfenen Anreizkonzepts: Ein dezentrales Ökosystem wie moveID profitiert nach den Erkenntnissen von 51nodes von gestuften Anreizen, die einen wirtschaftlichen Betrieb erst ermöglichen:

1. Zunächst waren **Bootstrapping-Zuschüsse** notwendig, um das Henne-Ei-Problem zu lösen und eine kritische Masse in der Simulation zu erreichen.
2. Anschließend sichern in der Simulation **leistungsbasierte Belohnungen** die Investitionen in eine höhere Service-Qualität bei den Infrastrukturanbietern, was zu höherer Nutzerzufriedenheit und damit zu langfristig höheren Umsätzen für alle Teilnehmer führte.

Bei den Ergebnissen von 51nodes sind die Begrenzungen des Simulationsansatzes zu beachten. Das Verhalten der simulierten Agenten basierte auf vereinfachten Regeln und der Annahme rationalen Handelns. Komplexes, reales menschliches Verhalten wie begrenzte Rationalität oder Markentreue wurde nicht abgebildet. Zudem operiert das Simulationsmodell als geschlossenes System und ignoriert externe Faktoren wie den Eintritt neuer Wettbewerber, regulatorische Änderungen oder wirtschaftliche Schocks. Schließlich sind die verwendeten Simulationsparameter, etwa für Kosten und Gewinnmargen, zwar plausibel gewählt, aber nicht anhand realer Marktdaten kalibriert. Aus diesen Gründen können die Ergebnisse nicht im Sinne präziser wirtschaftlicher Prognosen mit bekannter Eintrittswahrscheinlichkeit interpretiert werden. Nichtsdestotrotz sind unter Beachtung der gewählten Annahmen Aussagen über Wirkzusammenhänge möglich, die beim Aufbau einer moveID-Plattform helfen können.

2.1.1.4 AP 2.4 Pilotimplementierung zum technischen Nachweis SSI-basierter Mobilitätsnetzwerkkomponenten

Ziel (Soll):

- Konzeption und Aufbau der Entwicklungsumgebung
- Entwicklung agiler Entwicklungsmethoden und Prozesskoordination
- Überprüfung der techno-ökonomischen Machbarkeit gemeinsam mit ZU
- Verprobung der SSI-Implementierung mit Testpartnern

Ergebnis:

1. ***Ergebnis im AP2.4: Einbindung von realen Fahrzeugflotten, Mobilitätsservices, digitaler Infrastrukturbetreiber***

Eines der wichtigsten praktisch-technischen Ergebnisse des Projekts war der erfolgreiche Demonstrator am Rande der Messe IAA Mobility 2023. Das Ziel der Demonstration war es, die praktische Integration von realen Fahrzeugen, digitalen Mobilitätsdiensten und physischer Infrastruktur (wie Ladesäulen und Zufahrtsschranken) in das dezentrale moveID-Ökosystem für digitale Mobilitätsdienste und Datenräume zu validieren. Dazu wurde der Anwendungsfall „Peer-to-Peer Park and Charge“ von dem moveID-Konsortium umgesetzt und aus Sicht von 51nodes eindrucksvoll demonstriert. Der Anwendungsfall umfasste die Parkplatz-Suche, die Reservierung, Bezahlung und Zugangskontrolle, wobei alle Teile digital und nahtlos in einer einzigen mobilen App zusammengeführt worden waren.

Die entwickelte Systemarchitektur (siehe Abbildung 7) wurde in dem Demonstrator instanziiert und die Prozessvorlage für „Mobility Commerce“ (siehe Abbildung 8) auf die Straße gebracht und öffentlich demonstriert und mit Interessenten diskutiert (siehe Abbildung 9). 51nodes trug vor allem eine funktionierende Autorisierung für die Dienstnutzung auf Basis der SSI-Technologie bei.

Demonstration von "Peer-to-Peer Park and Charge" auf der IAA und Ablauf

Der Demonstrator bildete einen vollständigen Nutzungszyklus für „Parken und Laden“ eines E-Fahrzeugs ab. Ein Nutzer buchte über eine eigens entwickelte mobile App einen Parkplatz inklusive Ladesäule für einen bestimmten Zeitraum und bezahlte elektronisch. Die von 51nodes bereitgestellte SSI-Infrastruktur spielte dabei eine wichtige Rolle: Sie war für die Ausstellung und Überprüfung von digitalen Nachweisen (Verifiable Credentials) als Zugangsberechtigung verantwortlich. Nach der Buchung erhielt das Fahrzeug (im Demonstrator ein Jaguar I-PACE) ein digitales Ticket als Verifiable Credential in seine fahrzeugeigene Wallet. Bei der Ankunft am Parkplatz – dessen Zufahrt durch eine reale Ampel als Schranken-Ersatz simuliert wurde – und an der Alfen-Ladestation, präsentierte das Fahrzeug diesen Nachweis. Die Schranke wurde automatisch geöffnet, ohne dass eine zentrale Plattform oder eine manuelle Interaktion erforderlich war. Die Infrastruktur-Komponenten (Ampel und Ladesäule) prüften das Credential mittels der Verifizierungs-Software von 51nodes und gewährten daraufhin den Zugang und starteten den Ladevorgang.

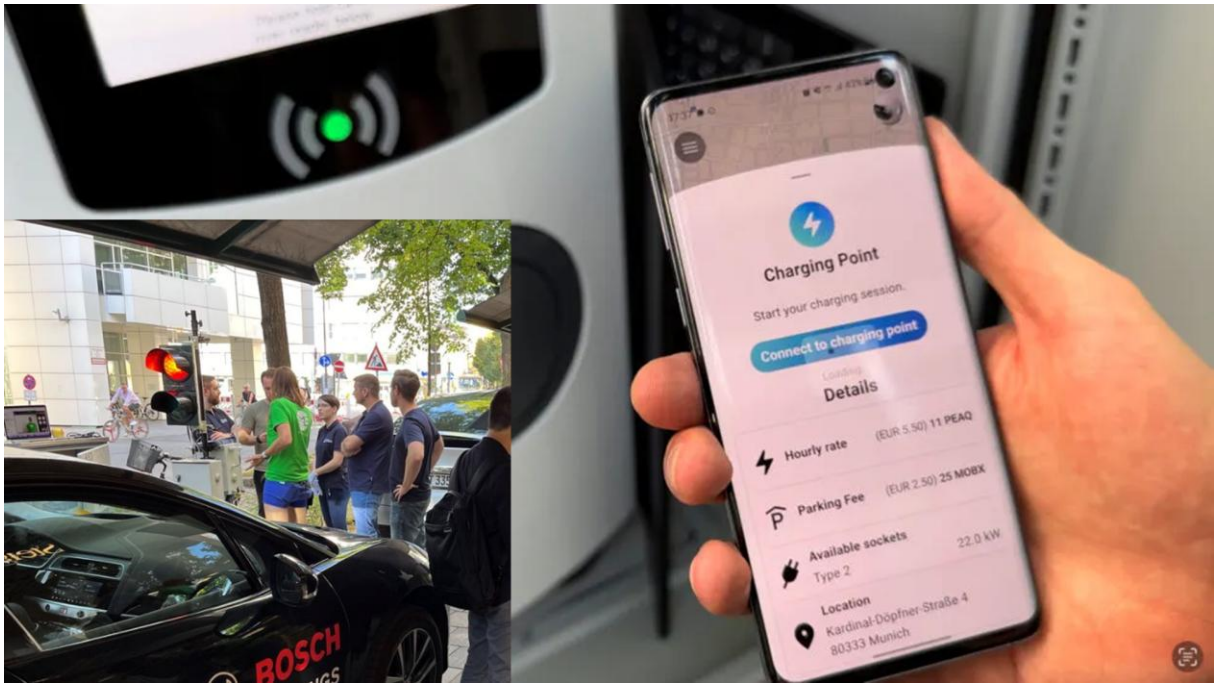


Abbildung 9: Öffentliche Demonstration des "Parken und Laden" Demonstrators in München mit SSI-basiertem Zugang zum Ladepunkt von 51nodes (Fotos: moveID-Konsortium, 2023)

Das Ergebnis war ein erfolgreicher Demonstrator, der zeigte, dass der Autorisierungsablauf mittels SSI und die elektronische Zahlungsabwicklung unter Nutzung von digitalen Tokens in einem realen Szenario auf der Straße funktioniert. Es wurde demonstriert, wie Fahrzeuge und Verkehrsinfrastruktur ohne zentrale Vermittler interagieren können, um Mobilitätsdienste nahtlos zu nutzen und abzurechnen.

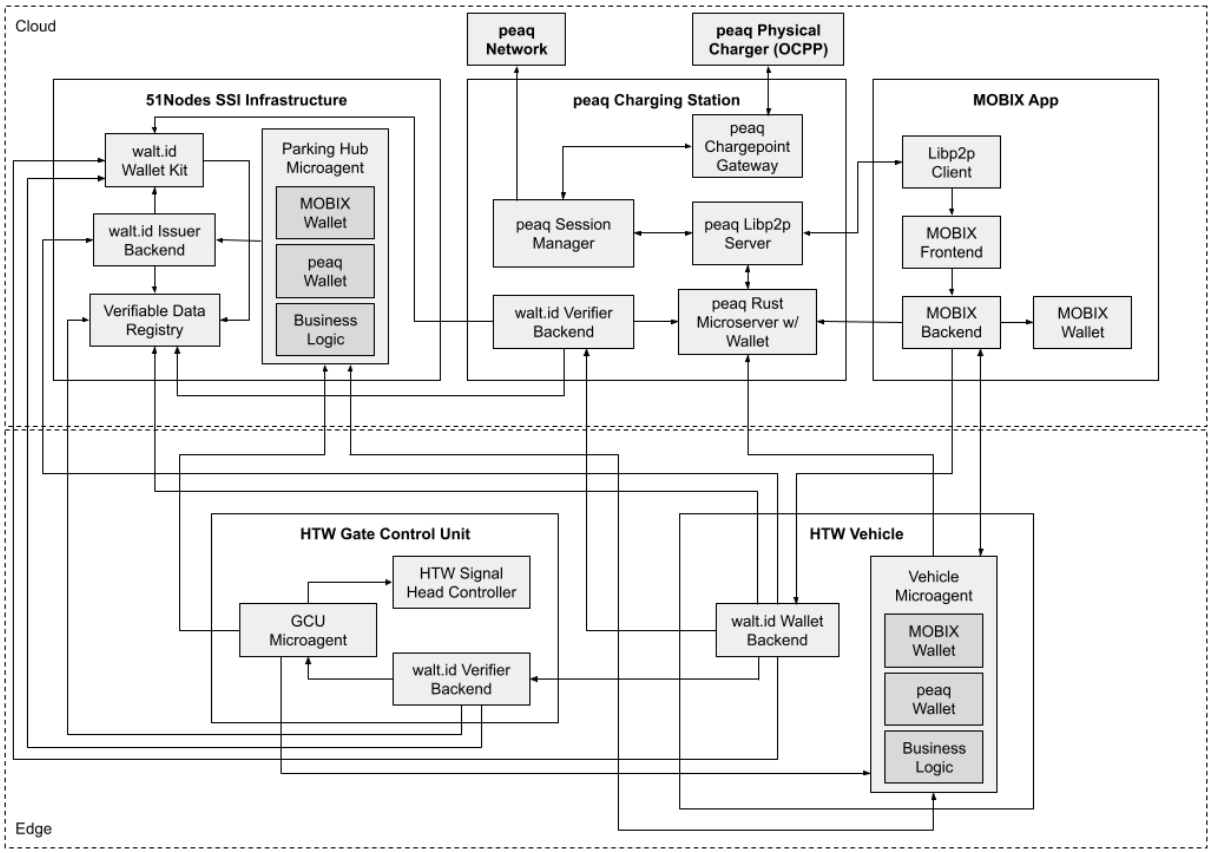


Abbildung 10: 51nodes trug die SSI-Infrastruktur für die Autorisierung von Park- und Ladevorgängen in der Architektur des IAA 2023-Demonstrators bei (Autoren: moveID Konsortium)

Die Self-Sovereign Identity (SSI)-Infrastruktur von 51nodes

Die SSI-Infrastruktur von 51nodes (siehe Abbildung 10, oben links) war entscheidend, um den sicheren digitalen Austausch von Berechtigungsnachweisen zwischen Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur (dem Ladegerät und der Ampel-basierten Zugangskontrolle zum Parkplatz) zu ermöglichen. Die von 51nodes entwickelte Infrastruktur bestand aus mehreren Java-Anwendungen, die mithilfe von den SDKs von walt.id und der did:web DID-Methode die Ausstellung und Überprüfung der Credentials realisierten. Die Kernkomponenten umfassten:

- Ein **Issuer Backend**, das die Credentials ausstellte und dabei prüfte, ob der Anfragende (z. B. ein Fahrzeug) dazu berechtigt war.
- Ein **Vehicle Wallet Backend**, das als digitale Brieftasche im Fahrzeug fungierte, um DIDs zu erstellen, Credentials als Zugangsberechtigung zu Verkehrsinfrastruktur zu empfangen und diese bei Bedarf vorzuzeigen.
- Ein eigens implementiertes einfaches **Verifiable Data Registry (VDR)**, das die DID-Dokumente speicherte und über einen Resolver öffentlich zugänglich machte.
- Ein **Verifier Backend**, das die von einem Fahrzeug vorgelegten Credentials überprüfte, um den Zugang zu einem Dienst (z. B. das Öffnen der Schranke oder das Starten des Ladevorgangs) zu gewähren.

Diese Komponenten wurden von 51nodes in einer Cloud-Instanz bereitgestellt und mit den anderen, von Projektpartnern bereitgestellten Komponenten des Demonstrators (siehe Abbildung 10) integriert. Dadurch schuf 51nodes ein vollständiges System für den gesamten Lebenszyklus der digitalen Berechtigungsnachweise innerhalb des Demonstrators.

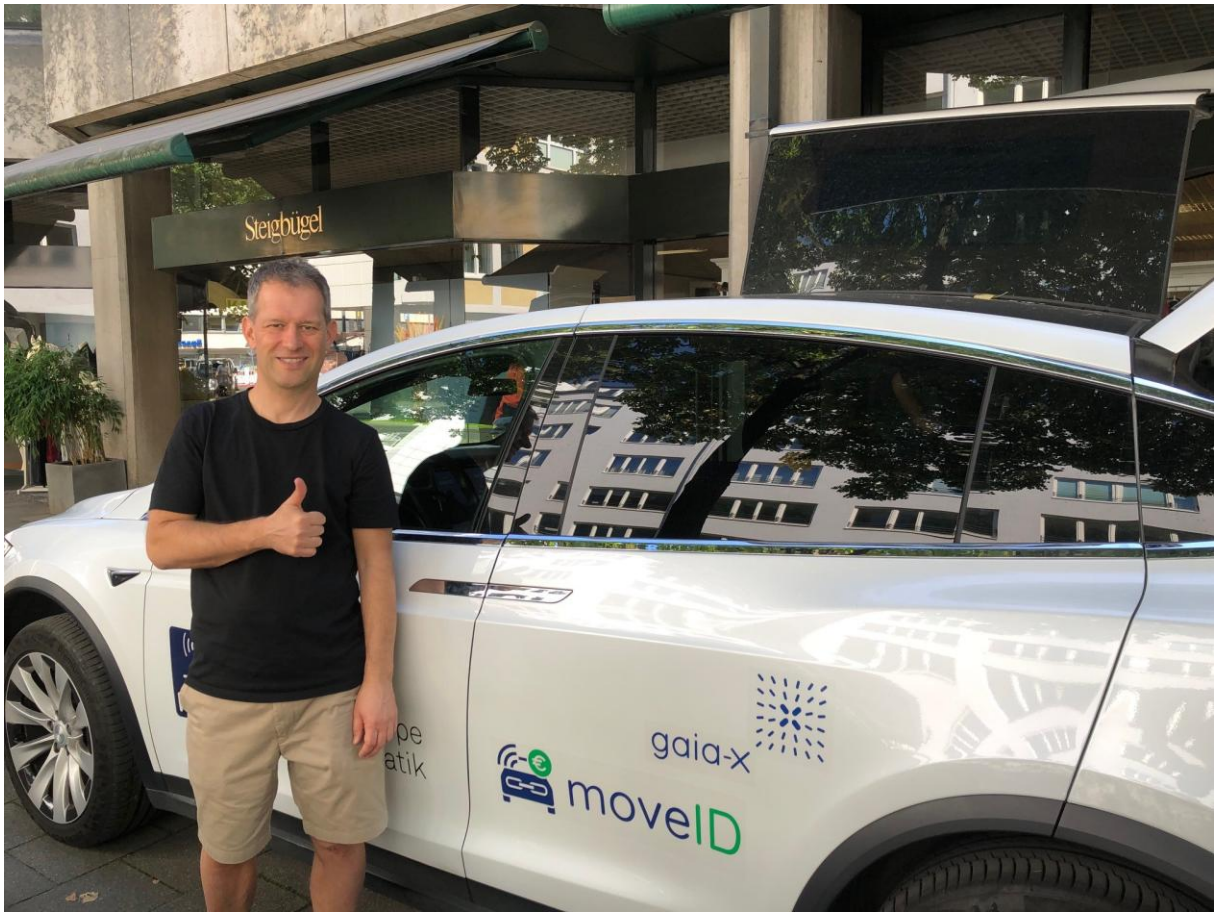


Abbildung 11: Jochen Kaßberger, Geschäftsführer von 51nodes, bei der IAA 2023 Demonstration von moveID (Foto: Achim Klein)

Entwicklung eines Mobility-SSI-Frameworks als Open-Source-Software

Im Laufe des Projekts traf 51nodes eine wichtige Entscheidung. Anstatt eine rein für den Demonstrator entwickelte, maßgeschneiderte Software zu erstellen, die bald Gefahr laufen würde, zu veralten, initiierte 51nodes die Konzeption und Entwicklung eines neuen, nachhaltiger und breiter nutzbaren SSI-Softwareframeworks. Diese Entscheidung zielte auch darauf, die Verwertbarkeit der Projektergebnisse durch 51nodes sicherzustellen.

Das Ziel des Mobility-SSI-Frameworks von 51nodes ist es, eine wiederverwendbare und einfach zu adaptierende Software-Basis für SSI-basiertes Identitätsmanagement für Mobilitätsdienste bereitzustellen. Das Framework trägt dabei maßgeblich zur Realisierung des Zielszenarios des Teilprojekts 2 bei, eine digitale Identitätsinfrastruktur für das moveID-Ökosystem zu etablieren. Das entwickelte Framework ist als Open Source verfügbar, um die Adaption von SSI im Mobilitätssektor zu fördern.

Architektur und Komponenten

Als technologische Basis wurde der walt.id Community Stack[69] (v0.14.0) gewählt, eine aus Sicht von 51nodes moderne und auf offenen Standards basierende Open-Source-Bibliothek. Damit wurde auf ein aktiv sich entwickelndes, internationales Ökosystem aufgesetzt, das die Konformität mit globalen Standards (W3C, OIDF) und regulatorischen Vorgaben (z.B. eIDAS2) anstrebt(e) und sicherstellt(e).

Das von 51nodes im letzten Projektjahr entwickelte Framework bildet die drei Kernabläufe eines SSI-Ökosystems ab: das Onboarding von Identitäten, die Ausstellung von Verifiable Credentials und deren Nutzung zur Autorisierung bei Diensten (siehe Abbildung 12). Das Ergebnis ist kein isolierter Prototyp, sondern ein wiederverwendbares, zukunftsfähiges Rahmenwerk für das gesamte deutsche Mobilitätsdiensteökosystem.

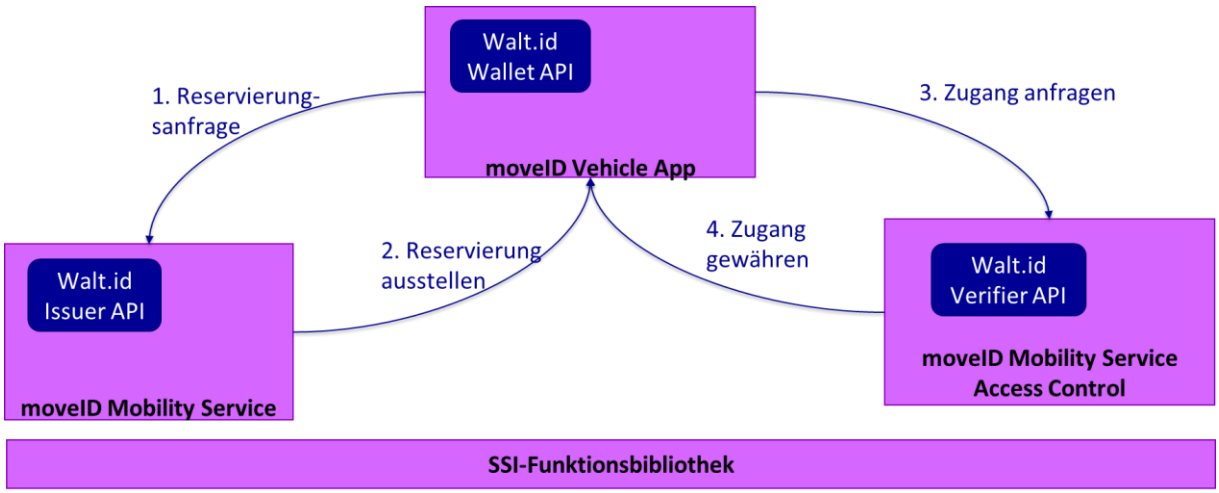


Abbildung 12: SSI-basierter Autorisierungsablauf mit dem Mobility SSI Framework von 51nodes (Autor: Julian Voelkel, 51nodes)

Die Architektur des SSI-Frameworks umfasst mehrere Schlüsselkomponenten, die als Referenzimplementierung dienen:

- **Vehicle Controller:** Agiert im Namen des Fahrzeugs. Er kann DIDs und DID-Dokumente verwalten sowie Verifiable Credentials annehmen und präsentieren.
- **Mobility Service Booking (MSB) Controller:** Er ist für die Ausstellung von VCs unterschiedlicher Typen über OID4VC zuständig.
- **Mobility Service Device (MSD) Controller:** Eine Komponente, die im Namen eines Diensteanbieters die ausgestellten VCs verifiziert.
- **Library:** Eine Bibliothek mit Funktionen und Schnittstellen zur Interaktion mit den walt.id APIs (waltid-client): und dem eigenständigen Web VDR (web-vdr-client), was die Wiederverwendbarkeit des Codes fördern soll.

[69] https://walt.id/community-stack

- **Web VDR:** Eine Implementierung von 51nodes einer "Verifiable Data Registry" für did:web, da die walt.id-Komponenten hierfür nicht alle notwendigen Funktionalitäten boten.

Die Kommunikation und der Datenaustausch zwischen den Komponenten basieren auf den Protokollen **OID4VC** (OpenID for Verifiable Credential Issuance) und **OID4VP** (OpenID for Verifiable Presentations).

Die entwickelten Komponenten basieren auf modernen und leichtgewichtigen Technologien, um einen flexiblen Einsatz, potenziell auch auf Edge-Geräten, zu ermöglichen:

- **TypeScript**
- **Deno**[70]
- **Hono**[71] (ein Web-Framework für Deno)

Vorteile und Anpassungsfähigkeit

Das Mobility SSI-Framework bietet die folgenden Vorteile für die Entwicklung von Mobilitätsdiensten:

- **Schnelle Adaption von SSI:** Das Framework ermöglicht eine zügige Implementierung von SSI für die Autorisierung bei der Dienstenutzung mit nur wenigen Code-Änderungen.
- **Wiederverwendbarkeit:** Die Architektur ist modular. Für Anwendungsfälle, die sich auf Fahrzeuge beziehen, müssen nur der MSD-Controller und die JSON-LD Schema-Dateien angepasst werden. Für Nicht-Fahrzeug-Anwendungsfälle dienen die Komponenten als Referenzimplementierung.
- **Open Source:** Das gesamte Rahmenwerk ist unter der kommerziell freizügigen MIT-Lizenz[72] verfügbar, was die Nutzung und Weiterentwicklung befördern soll.

Mögliche Erweiterungen und Ausblick

Das SSI-Framework ist als Grundlage für zukünftige Entwicklungen konzipiert. Mögliche Erweiterungen umfassen:

- **SSI auf Edge-Geräten:** Betrieb der Komponenten auf Fahrzeughardware ohne permanente Internetverbindung.
- **Gaia-X Integration:** Nutzung von Gaia-X Credential Schemas und die Anbindung an den Gaia-X Service Katalog und die Digital Clearing Houses (GXDCH).
- **Interoperabilität:** Erweiterung um weitere DID-Methoden wie did:peaq oder did:cheqd.
- **Bezahloptionen:** Integration von On-Chain- oder Off-Chain-Bezahlmöglichkeiten.

---

[70] https://deno.com/

[71] https://hono.dev/

[72] https://opensource.org/license/mit

Verfügbarkeit

Der Quellcode des SSI-Frameworks von 51nodes für Mobilitätsdienste ist vollständig dokumentiert und öffentlich dauerhaft auf der Plattform GitHub verfügbar unter https://github.com/51nodes/mobility-ssi.

Einordnung des Mobility-SSI-Frameworks

Zur Einordnung des Mobility SSI-Frameworks von 51nodes zeigt die folgende Tabelle Ergebnisse eines Vergleichs mit dem früheren SSI-Ansatz im Rahmen des IAA-Demonstrators von 51nodes und dem vom Projektpartner ITK, der u.a. für den Hannover-Messe-Demonstrator 2024 entwickelt wurde.

	ITKs SSI-Stack für Hannover Messe-Demonstrator (2024/25)	**51nodes Mobility SSI-Framework (2025)**	**Park & Charge IAA-Demonstrator (2023)**
Beschreibung	Ein umfassender Stack, der mit verschiedenen miteinander verbundenen Komponenten strukturiert ist, um ein robustes Framework für die Identitätsprüfung und -verwaltung bereitzustellen.	Mobility-SSI-Framework für fahrzeugbezogene Anwendungsfälle. Entwickelt von 51nodes im Rahmen des moveID-Projekts.	Für den Demonstrator entwickelte 51nodes mehrere Bausteine auf Basis des walt.id IDP Kits um zu zeigen, wie SSI auf Edge-Geräten genutzt werden kann.
Open Source	Nein (nur Projekt-intern verfügbar)	Ja	Nein (nur Projekt-intern verfügbar)
Sprache	Java	Typescript	Kotlin
Kommunikationsprotokolle	OID4VC / OID4VP	OID4VC / OID4VP	W3C VC
Dokumentationsqualität	Durchschnittlich	-	-
DID-Methoden	did:web	did:web	did:web
Gaia-X-Integration	Ja	Nein	Ja
Edge-Fähigkeiten	Nein	Nein	Ja

Formate für Verifiable Credentials	JWT-VC, JSON-LD	JWT-VC, JSON-LD	JWT-VC
Letzte Aktivität (<3M)	Nein	Ja	Nein
Link	https://fgvt.htwsaar.de/gitlab/moveid (moveID-intern)	https://github.com/51nodes/mobility-ssi	https://gitlab.com/51nodes/open-bosch-project (moveID-intern)

Tabelle 6: Vergleich der SSI-Stacks für Mobilitätsdienste aus dem moveID-Projekt (Autor: Julian Voelkel, 51nodes; Stand 2025-09)

2. *Ergebnis im AP2.4: Überprüfung wirtschaftliche Machbarkeit der technischen Systemarchitektur*

Im AP2.4 hat 51nodes die ökonomische Evaluation der Systemarchitektur (Ergebnis E2.4.4) federführend geleitet, zentrale Beiträge geleistet und in der Erstellung der Ergebnisse mit den Partnern zusammengearbeitet. Das Ziel der Evaluation war, die Voraussetzungen für einen wirtschaftlich tragfähigen Betrieb des dezentralen moveID-Ökosystems als zweiseitige Plattform für digitale Mobilitätsdienste zu erörtern und das ökonomische Potenzial einzuschätzen.

Methodik der Evaluation

Die Evaluation identifizierte zunächst die wesentlichen Voraussetzungen für den wirtschaftlichen Betrieb, darunter einen hohen technologischen Reifegrad (TRL), profitable Geschäftsmodelle der Anwendungen, eine hohe Nutzerfreundlichkeit zur Förderung der Akzeptanz, die Validierung der Dienste durch Pilotprojekte und die nachhaltige (Anschub-)Finanzierung der Betriebskosten der Plattform, z.B. auch durch Öffentlich-private-Partnerschaften oder Förderungen.

Für die Abschätzung des ökonomischen Potenzials der moveID-Plattform wurde ein Top-Down-Ansatz verwendet. Dieser Ansatz prognostiziert das Umsatzpotenzial auf drei Ebenen. (1) Die erste Ebene ist der **TAM** (Total Addressable Market), der das theoretische maximale Marktvolumen in der EU bei einer 100%igen Marktdurchdringung beschreibt. (2) Davon abgeleitet wird als Teilmenge der **SAM** (Serviceable Available Market) als der realistische Anteil am TAM, den die moveID-Plattform als dezentrale Infrastruktur potenziell adressieren kann. (3) Die dritte Ebene ist der **TM** (Target Market), welcher den Anteil am SAM abbildet, der die potenziellen Einnahmen der moveID-Plattform, beispielsweise durch Servicegebühren, aus den auf ihr betriebenen Anwendungsfällen darstellt.

Im Bericht E2.4.4 wurden zehn wirtschaftlich bedeutende Anwendungsfälle für die moveID-Plattform identifiziert: Car Fuelling, Automotive Infotainment Services, Smart Parking, Robo Taxi Services, Smart EV Charging, Car Data Marketplace, Peer2Peer Carshare, Car Sharing, EV Grid Integration, Peer2Peer EV Charging. Die hier gezeigten Schätzergebnisse konzent-

rieren sich jedoch auf die vier wesentlichen Anwendungsfälle, die im Projektverlauf von moveID technisch entwickelt und demonstriert wurden, da diese aufgrund der Vorarbeit im Projekt am dichtesten an einer möglichen produktiven Umsetzung eingeschätzt wurden:

- **Data Provenance (Datenherkunft):** Anwendungen rund um Fahrzeug- und Mobilitätsdaten, deren Herkunft nachverfolgbar und deren Integrität sichergestellt ist.
- **Road Condition Monitoring (Straßenzustandsüberwachung):** Dezentrale Erfassung von Straßen und Analyse des Straßenzustands, typischerweise durch Kameras in regulären Fahrzeugflotten.
- **Smart Parking:** Effizientere, komfortablere und nachhaltigere Parkraumnutzung durch Echtzeitinformationen und Buchungsmöglichkeiten.
- **Zoning:** Geografische Steuerung, Bepreisung und Abrechnung von Mobilitätsdiensten anhand virtuell eingerichteter Zonen im öffentlichen Verkehrsraum, beispielsweise zur Regulierung von Umweltzonen oder Zufahrtsbeschränkungen.

Umsatzprognosen

Die Prognosen der Umsätze für die beschriebenen vier Hauptanwendungsfälle aus dem moveID-Projekt zeigen das folgende wirtschaftliche Potenzial: Der europäische Gesamtmarkt (TAM) für die vier Anwendungsfälle allein soll von geschätzten 4,7 Milliarden Euro im Jahr 2025 auf geschätzte 57,8 Milliarden Euro im Jahr 2040 anwachsen in einer Schätzung (siehe Abbildung 13). Smart Parking stellt dabei den größten Einzelmarkt in der Betrachtung unten dar.

No.	Use Case	TAM 2025	TAM 2030	TAM 2035	TAM 2040	CAGR (%)
1	Data Provenance	0,4	3,0	9,3	16,2	28,0%
2	Road Condition Monitoring	0,5	1,0	1,9	2,6	11,6%
3	Smart Parking	3,6	8,4	14,7	34,0	18,3%
4	Zoning	0,1	0,5	2,0	5,0	36,0%
	Sum	4,7	13,0	27,9	57,8	in billion

Abbildung 13: Geschätzter Gesamtmarkt (TAM) in der EU für Gaia-X 4 moveID-Anwendungsfälle in Mrd. Eur in den Jahren 2025, 2030, 2035 und 2040 mit jährlicher Wachstumsrate (CAGR) (Autoren: Vincent Geilenberg, Achim Klein, das moveID-Konsortium)

Die Prognose des TAM stützt sich unter weitergehenden Annahmen auf folgende Quellen:

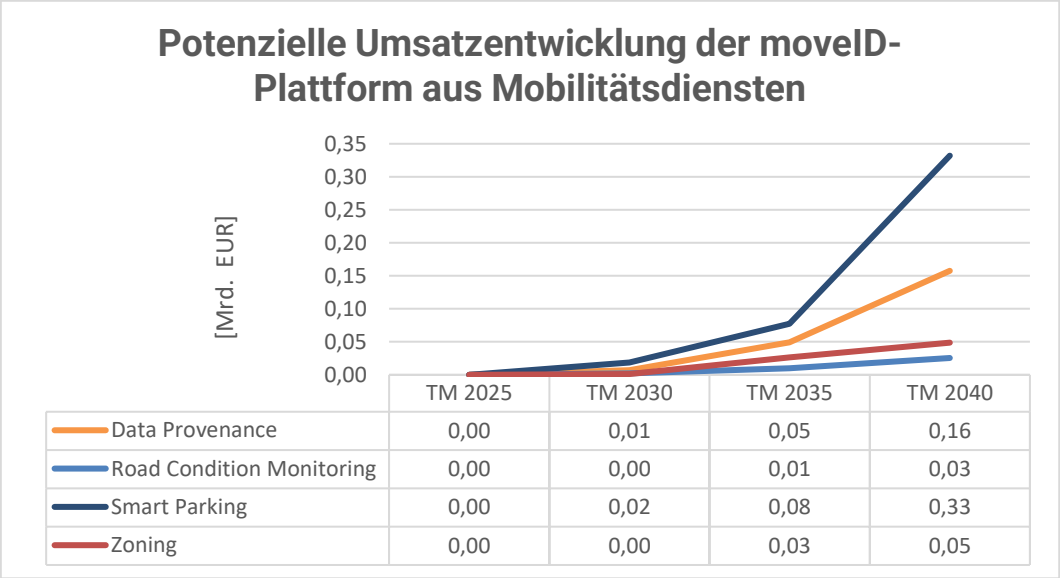
Anwendungsfall	Schätzansatz	Quelle
Data Provenance	Umsatzerlöse auf dem EU-Markt für Automobilkomponenten 2025: 457 Mrd. USD = 407 Mrd. EUR, 2033: 642 Mrd. USD = 572 Mrd. EUR, CAGR 4,3 % (siehe Quelle); Potenzieller Wertpool für Anwendungsfälle der Datenherkunft: 3 % des Umsatzes mit Komponenten; Angenommener Realisierungsfaktor für Anwendungsfälle der Datenherkunft pro Jahr 2025: 3,5%; 2030: 20%, 2035: 50%, 2040: 70%.	https://www.cognitivemarketresearch.com/automotive-components-market-report
Road Condition Monitoring	Die Instandhaltungsausgaben für die Straßeninfrastruktur in 20 EU-Ländern beliefen sich 2022 auf insgesamt 22,721 Mrd. Euro ohne Deutschland (siehe Quelle); wir gehen von einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 2,41 % aus, da sich die Ausgaben 2017 auf insgesamt 20,169 Mrd. Euro beliefen; Wir gehen davon aus, dass die Gesamtausgaben der EU 1,5-mal so hoch sind; wir gehen davon aus, dass die Ausgaben für die digitale Überwachung des Straßenzustands im Jahr 2025 1,5%, im Jahr 2030 2,5%, im Jahr 2035 4% und im Jahr 2040 5% der gesamten Instandhaltungsausgaben betragen werden.	Table 4.5 "Maintenance expenditures in road infrastructure" for 20 EU countries https://erf.be/statistics/road-maintenance-and-investment-2024/
Smart Parking	Der europäische Markt für intelligente Parklösungen hat bereits 2024 ein Marktvolumen von 3,5 Milliarden US-Dollar und 2029 von 7,98 Milliarden US-Dollar erreicht. Es wird erwartet, dass das Marktpotenzial aufgrund technologischer Entwicklungen im Laufe der Zeit weiter steigen wird. Die CAGR von 18,3 % von 2024 bis 2029 wird auf 2040 extrapoliert. 1 USD = 0,89 EUR.	https://www.mordorintelligence.com/de/industry-reports/europe-smart-parking-market
Zoning	Schätzung der EU-weiten Einnahmen für SSI-basierte Zoneneinteilung mit Annahmen für 2025: Anfangsphase, kleine Projekte, vor allem Forschung und Entwicklung; 2030: erste Ausweitung, erforderliche Technologie ist weiterverbreitet, Städte suchen nach digitalen Lösungen für Klimaziele; 2035: breitere Akzeptanz und Ausweitung der Dienstleistungen; SSI-basierte dynamische Zoneneinteilung wird zum Standard für die Mobilität in Smart Cities; 2040: reifer Markt, voller Wert erschlossen, tiefe Integration.	https://international.eco.de/wp-content/uploads/dlm_uploads/2021/08/smart_city_study_2021-2026_en-1.pdf

Tabelle 7: Schätzung der Marktgröße in der EU für die moveID-Anwendungsfälle (Autoren: Vincent Geilenberg, Achim Klein, das moveID-Konsortium)

Es wird angenommen, dass die moveID-Plattform ihren Anteil am adressierbaren Markt (SAM) durch ihre dezentralen Vorteile stark ausbauen kann – von 0,1 % im Jahr 2025 auf 65 % im Jahr 2040. Dies entspräche einem adressierbaren Marktvolumen (SAM) von 37,6 Milliarden Euro im Jahr 2040.

Für die Einnahmen der moveID-Plattform (Target Market, TM) selbst wurden zwei Szenarien betrachtet:

- Szenario 1 (nur die vier moveID-Anwendungsfälle): Geht man von einer 5%igen Servicegebühr der moveID-Plattform für die vier im Projekt entwickelten Anwendungsfälle aus, wird der Plattformumsatz für 2040 auf 570 Millionen Euro geschätzt (siehe Abbildung 14).
- Szenario 2 (Gesamte Plattform mit zehn Anwendungsfällen): Eine breitere Schätzung, die annimmt, dass die Plattform 3 % des gesamten SAM (aller auf ihr laufenden Dienste, auch von Drittanbietern) als Infrastrukturgebühr einnimmt, prognostiziert ein Umsatzpotenzial von 1,128 Milliarden Euro bis 2040.



	TM 2025	TM 2030	TM 2035	TM 2040
Data Provenance	0,00	0,01	0,05	0,16
Road Condition Monitoring	0,00	0,00	0,01	0,03
Smart Parking	0,00	0,02	0,08	0,33
Zoning	0,00	0,00	0,03	0,05

Abbildung 14: Bei einer angenommenen Servicegebühr der moveID-Plattform von 5% und den geschätzten Umsätzen der moveID-Anwendungsfälle auf der Plattform könnte im Jahr 2040 der Umsatz aus den 4 Fällen auf 570 Mio. EUR wachsen (Autoren: Vincent Geilenberg, Achim Klein, das moveID-Konsortium)

Schlussfolgerungen

Aus der ökonomischen Evaluation leitete 51nodes Empfehlungen ab. Als Kernproblem wird der Aufbau einer kritischen Masse an Anbietern und Nutzern auf der moveID-Plattform wahrgenommen. 51nodes empfahl einen pragmatischen Ansatz für den Markteintritt. Angesichts noch bestehender technischer und regulatorischer Hürden (z.B. bei digitalen Identitäten und SSI) könnte eine frühe Version der Plattform zunächst auf etabliertere Identitätstechnologien setzen. Dies würde es ermöglichen, den Mehrwert des Ökosystems frühzeitig zu demonstrieren und Partner schneller zu gewinnen.

Der Rollout der moveID-Plattform sollte als Empfehlung schrittweise erfolgen, beginnend mit fokussierten Nutzergruppen oder in bestimmten Regionen. Sobald die Plattform etabliert wäre, könnte ein Übergang zu einer Plattform basierend auf den vorgesehenen dezentralen Technologien (SSI und DLT) erfolgen. Zur Finanzierung des Aufbaus der Plattform wurde vorgeschlagen, trotz der Unsicherheit der wirtschaftlichen Prognosen, die Einwerbung von Risikokapital zu prüfen.

Zusammenfassend lässt die Evaluation der wirtschaftlichen Machbarkeit den Schluss zu, dass der Betrieb der moveID-Plattform wirtschaftlich sein kann, sofern es gelingt, einen bedeutenden Marktanteil in Europa zu gewinnen und die Herausforderung des initialen Ökosystem-Aufbaus strategisch zu meistern.

2.1.2 Teilprojekt 3 (TP3): Data Sharing im Daten- und Dienst-Ökosystem

Im **Teilprojekt 3 (TP3): Data Sharing im Daten- und Dienst-Ökosystem** liegen folgende Ergebnisse vor:
Ziel (Soll): Kontinuierlicher Austausch relevanter Informationen aus den AP 2.1, 2.2 und 2.3

Ergebnis:
51nodes beteiligte sich am Austausch mit TP3 als Stakeholder von TP2.

2.1.3 Teilprojekt 4 (TP4): Vehicle2X Services in heterogenen, dezentralen Mobilitätsinfrastrukturen

Im **Teilprojekt 4 (TP4): Vehicle2X Services in heterogenen, dezentralen Mobilitätsinfrastrukturen** liegen folgende Ergebnisse vor:

Ziel (Soll): Abstimmung und Abgleich der Anforderungen bzgl. SSI-Konzepte bezüglich AP 2.1 und AP 2.2

Ergebnis:

Der Austausch mit den Partnern des TP4 stellte die kontinuierliche Abstimmung sicher. Parallel dazu lag ein starker Fokus auf der teilprojektübergreifenden Zusammenarbeit. In Kooperation mit der TP4-Leitung wurde die Zusammenarbeit mit TP2 abgestimmt, um insbesondere die Verknüpfung der technischen Systemarchitektur aus AP2.3 mit den übergreifenden architekturellen Arbeiten in AP1.3 zu gewährleisten. Die Abstimmung diente auch dazu, eine gemeinsame konzeptionelle Ausrichtung, speziell bei den zu integrierenden SSI-Konzepten, sicherzustellen. Als konkretes Ergebnis wurden von 51nodes, ausgehend von der Vorhabensbeschreibung des Projekts, Diagrammentwürfe für die Anwendungsfälle des Projekts im TP4 erstellt.

2.1.4 Teilprojekt 6 (TP6): Austausch innerhalb der Projektfamilie GAIA-X Future Mobility, Zusammenarbeit mit weiteren Initiativen / Projekten und Projektmanagement

Im **Teilprojekt 6 (TP6): Austausch innerhalb der Projektfamilie GAIA-X Future Mobility, Zusammenarbeit mit weiteren Initiativen / Projekten und Projektmanagement** liegen folgende Ergebnisse vor:

Ziel (Soll): Leitung des Arbeitspakets 2.1 Technologiesichtung, Dokumentation der Technologiesichtung in AP 2.1

Ergebnis:

Im Rahmen des Projekts Gaia-X 4 moveID übernahm 51nodes über die gesamte Projektlaufzeit die Leitung, Organisation und Koordination des Teilprojekts 2 (TP2), stets in enger Abstimmung mit dem Gesamtprojektleiter Bosch. Diese Verantwortung umfasste die Steuerung der Arbeitspakete AP2.1 (Analyse und Konzeption), AP2.2 (SSI-Interoperabilität) und AP2.3.

Zur Sicherstellung eines strukturierten Projektablaufs etablierte 51nodes eine quartalsweise Planung der Arbeiten und organisierte regelmäßige Online-Besprechungen. In diesen Terminen wurde der aktuelle Stand des Teilprojekts, der Fortschritt der Aufgaben und die Organisation zur Erstellung der Arbeitsergebnisse koordiniert und die Resultate transparent kommuniziert. Während 51nodes die übergreifende Steuerung innehatte, wurde die Umsetzung einzelner Ergebnisse und Berichte plangemäß an die jeweils zuständigen Partner übergeben; in späteren Projektphasen übernahmen andere Projektpartner teilweise die Organisation und Erstellung einzelner angestrebter Ergebnisse und der dazugehörigen Arbeitsberichte.

Für eine effiziente Zusammenarbeit und ein transparentes Wissensmanagement implementierte und pflegte 51nodes die zentrale Arbeitsinfrastruktur des TP2. Dies umfasste die Strukturierung und Verwaltung eines Cloud-basierten Repositories zur Dateiablage und gemeinsamen Bearbeitung von Dokumenten. Parallel dazu wurde ein dedizierter Bereich in einer Versionierungsumgebung aufgebaut und gepflegt. Ergänzend wurden mehrere virtuelle Whiteboards für die konzeptionelle Zusammenarbeit entworfen und gepflegt. Die fortlaufende Organisation der TP2-Arbeiten sowie die Kommunikation zum Status der Arbeitsberichte erfolgte maßgeblich über einen Chatkanal, unterstützt durch ein Kanban-Board zur Aufgabenverfolgung. Weiterhin erstellte und pflegte 51nodes die Literaturverwaltung des TP2 in einer Zotero-Gruppe.

Ein wesentlicher Beitrag von 51nodes lag zudem im aktiven Partner- und Stakeholder-Management. Zu Beginn wurden in Einzelgesprächen die Expertise, Projektziele und erwarteten Beiträge der TP2-Partner erhoben und eine zentrale Liste der Ansprechpartner und Kompetenzbereiche erstellt. 51nodes initiierte den Austausch mit relevanten externen Akteuren wie IDunion, cheqd und mySaveID (siehe Kapitel 1.5).

Besonders hervorzuheben ist die Synchronisation mit den Schwesterprojekten der Projektfamilie GAIA-X 4 Future Mobility. 51nodes stellte hierfür zentrale Ergebnisberichte des TP2 wie die Technologieevaluation (E2.1.2) und die Analyse der SSI-Interoperabilität (E2.2.2), zur Nutzung und Abkürzung von Recherchearbeiten in den Schwesterprojekten bereit. Es wurde zudem ein gemeinsamer Softwaredemonstrator zur Darstellung von SSI-Interoperabilität mit dem Schwesterprojekt AMS angeregt. Auf Initiative des Projektpartners Continental beteiligte sich 51nodes, unter Einbringung bereits vorhandener Expertise, aktiv an den Diskussionen mit

MOBI zur Entwicklung eines gemeinsamen Prototyps für SSI-Interoperabilität. Siehe hierzu auch Kapitel 1.5.

Im Projektverlauf wurden die Arbeitspakete im TP2 erfolgreich abgeschlossen und die vorgesehenen Ergebnisberichte elektronisch bereitgestellt. 51nodes trug in seiner Rolle als TP2-Organisator wesentlich zur Planung und inhaltlichen Gestaltung der Vor-Ort-Gesamtprojekttreffen im Juli 2024 und Januar 2025 bei. Abschließend koordinierte und präsentierte 51nodes die konsolidierten Ergebnisse des Teilprojekts 2 auf dem Projektabschlusstreffen im Juni 2025.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises für 51nodes im Projekt Gaia-X 4 moveID sind Personalkosten. Die anderen Positionen (Reisekosten und sonstige unmittelbare Vorhabenkosten) sind dagegen aus Sicht von 51nodes vernachlässigbar.

Gegenüber der Vorkalkulation betragen die über die gesamte Projektlaufzeit tatsächlich entstandenen Personalkosten (inklusive Pauschalzuschlag) circa 79%. Der Minderaufwand gegenüber der Vorkalkulation entstand durch personelle Engpässe. Dennoch ist 51nodes der Meinung, dass seine wesentlichen Projektziele erreicht wurden.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten waren sowohl notwendig als auch angemessen, um die ambitionierten Projektziele zu erreichen.

Notwendigkeit: Die grundlegenden Analyse- und Architekturarbeiten zu Beginn waren unerlässlich, da es kein existierendes Vorbild für ein dezentrales SSI-basiertes Ökosystem im Mobilitätsbereich gab. Die Übernahme erweiterter Leitungsaufgaben durch 51nodes war notwendig, um die hohe Komplexität im TP2 zu steuern und die Vielzahl an Partnern zu koordinieren. Die praktische Umsetzung im IAA-Demonstrator war zwingend erforderlich, um die theoretischen Konzepte zu validieren und einen greifbaren Nachweis der Funktionsfähigkeit zu erbringen. Schließlich war die Entwicklung des neuen SSI-Frameworks notwendig, um auf die Veralterung der ursprünglich genutzten Softwarebibliotheken zu reagieren und die langfristige Verwertbarkeit der Ergebnisse zu sichern.

Angemessenheit: Die Arbeiten waren angemessen, da sie direkt auf die in der Vorhabensbeschreibung formulierten Ziele einzahlten, insbesondere auf die Schaffung einer "voll-interoperablen, digitalen Infrastruktur für Identitäten aller Verkehrsteilnehmer". Trotz einiger Zeitplanverschiebungen, die auf die Komplexität der Aufgaben und die Abhängigkeiten zwischen den Partnern zurückzuführen sind, wurden die wesentlichen Meilensteine erreicht und qualitativ hochwertige Ergebnisse erreicht. Die Fokussierung auf Open-Source-Software und die Zusammenarbeit mit internationalen Initiativen wie MOBI sollten zudem sicherstellen, dass die Ergebnisse anschlussfähig sind und einen breiten Nutzen entfalten können.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Der voraussichtliche Nutzen der Projektergebnisse von 51nodes konzentriert sich auf das im Projekt entwickelte und als Open-Source verfügbare **SSI-Framework**. Dieses Framework stellt eine gute technische Grundlage dar. Sein Nutzen liegt in der Vereinfachung, Beschleunigung und Kostenreduktion beim Onboarding von Identitäten – seien es Menschen, Maschinen oder Organisationen. Darüber hinaus schafft das Framework die Basis für eine selbstsouveräne Autorisierung beim Zugriff auf digitale Dienste und ermöglicht einen fälschungssicheren, nachweisbaren Zugriff auf Produktdaten, was für datenbasierte Mehrwertdienste wie „Predictive Maintenance“ essenziell ist. Es legt somit den Grundstein für eine vertrauenswürdige Interaktion in dezentralen Datenräumen, ganz im Sinne der Gaia-X-Architektur.

Die **Verwertbarkeit** der Ergebnisse von 51nodes wurde im Projektverlauf strategisch neu ausgerichtet. Eine Marktanalyse gegen Projektende (Mitte 2025) zeigte, dass Automobilhersteller aufgrund der Wirtschaftslage zögerlich bei Direktinvestitionen in umfassende SSI-Projekte sind. Die Etablierung eines breiten, über das Projekt hinausgehenden moveID-Ökosystems erscheint daher mangels privater Investitionsbereitschaft als fraglich. 51nodes passte seine Verwertungsplanung daran an und rückte von der Verfolgung eines breiten Ökosystem-Ansatzes ab.

Stattdessen fokussierte 51nodes die Verwertung auf **gezielte, punktuelle SSI-Lösungen für spezifische Anwendungsfälle**, die 51nodes im Rahmen von Beratungs- und Entwicklungsprojekten umzusetzen anstrebt. Das im Projekt aufgebaute Fachwissen und das entwickelte Open-Source-Framework sollen helfen, 51nodes als Berater für Unternehmen zu positionieren, die ihre Systeme und Dienste auf eine SSI-basierte Architektur umstellen und sich auf die Integration mit dem kommenden EUDI-Wallet-Ökosystem vorbereiten wollen. Das im Projekt entwickelte SSI-Framework soll hierbei als möglicher Einstiegspunkt dienen.

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen, der während der Durchführung dem Zuwendungsempfänger bekannt wurde

Die im Rahmen von Gaia-X 4 moveID erzielten Ergebnisse, insbesondere durch die Arbeit von 51nodes, basieren auf etablierten internationalen Standards und stehen im Einklang mit wegweisenden europäischen Initiativen. Diese Einordnung ist entscheidend, um die strategische Relevanz und Zukunftsfähigkeit der entwickelten Lösungen zu bewerten.

2.5.1 Ausrichtung an W3C- und OpenID-Standards

Die technische Grundlage des Projekts ist fest in den globalen Standards des World Wide Web Consortium (W3C) verankert. Die entwickelten Lösungen nutzen konsequent das „Verifiable Credentials Data Model“ zur Darstellung von digitalen Nachweisen und „Decentralized Identifiers“ (DIDs) zur Verankerung von Identitäten. Dies ist von entscheidender Bedeutung, da es die grundlegende Interoperabilität mit jedem anderen System sicherstellt, das ebenfalls auf diesen offenen Standards basiert.

Darüber hinaus positioniert sich das Projekt vorausschauend im Hinblick auf aufkommende Protokolle der OpenID Foundation. Die Protokollfamilie „OpenID for Verifiable Credentials“ (OID4VC) standardisiert die konkreten Abläufe zur Ausstellung (OID4VCI) und Präsentation (OID4VP) von Nachweisen. Durch die Verwendung moderner, modularer Softwarebibliotheken wie walt.id ist das von 51nodes entwickelte Framework architektonisch darauf vorbereitet, diese Protokolle zu integrieren, sobald sie den finalen Standardisierungsgrad erreichen. Dies sichert die zukünftige Kompatibilität mit einer breiten Palette von digitalen Wallets und Dienstanbietern.

2.5.2 Synergie mit der European Digital Identity (EUDI) Wallet

Die strategisch wichtigste Ausrichtung erfolgt im Hinblick auf die kommende European Digital Identity (EUDI) Wallet. Im Rahmen der eIDAS-2.0-Verordnung wird jeder EU-Mitgliedstaat verpflichtet, seinen Bürgern bis 2026 eine digitale Identitätsbörse anzubieten. Das technische Fundament dieser EUDI-Wallets, wie im Architecture and Reference Framework (ARF) beschrieben, wird ebenfalls auf den W3C-Standards für VCs und den OID4VC-Protokollen basieren.

Hier zeigt sich die weitsichtige Bedeutung des Gaia-X 4 moveID-Projekts: Es ist faktisch eine „Vorwegnahme“ der EUDI-Wallet-Architektur für den spezifischen Anwendungsbereich der Mobilität in Deutschland. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse und die entwickelte Technologie zur Ausstellung und Verifizierung von VCs für Fahrzeuge, Ladesäulen und Parkinfrastruktur sind nicht nur ein Forschungsergebnis. Sie stellen eine wertvolle Blaupause und einen entscheidenden Kompetenzaufbau dar, der direkt anwendbar sein wird, wenn deutsche Unternehmen der Automobil- und Mobilitätsbranche ihre Dienste an das verpflichtende EUDI-Wallet-Ökosystem anbinden müssen. Das Projekt leistet somit wichtige Pionierarbeit und bereitet die deutsche Industrie auf eine bevorstehende regulatorische und technologische Transformation vor.

2.5.3 Vergleichende Analyse mit Brancheninitiativen

Um die Positionierung des Projekts weiter zu schärfen, ist ein Vergleich mit anderen relevanten Initiativen im Bereich der dezentralen Mobilitätsidentität unerlässlich.

MOBI (Mobility Open Blockchain Initiative): MOBI ist ein globales Konsortium, das von großen Automobilherstellern (OEMs) vorangetrieben wird und den Standard für eine „Vehicle Identity“ (VID) entwickelt. Während es auf den ersten Blick Ähnlichkeiten gibt, zeigt eine genauere Analyse grundlegende Unterschiede in der strategischen Ausrichtung. Tabelle 8 stellt die Ansätze gegenüber.

Die Analyse zeigt, dass der MOBI-Ansatz stärker auf das Fahrzeug als Asset und dessen Lebenszyklus fokussiert ist (ein Top-down-Ansatz der Hersteller), während der Ansatz von Gaia-X 4 moveID darauf abzielt, ein offenes Service-Ökosystem zu ermöglichen, in dem Fahrzeuge, Infrastruktur und Dienstleister gleichberechtigt interagieren können (ein Bottom-up-Ansatz zur Ökosystem-Befähigung).

IDunion: Die aktive Zusammenarbeit mit IDunion war eine strategische Entscheidung, um die nationale und europäische Interoperabilität der entwickelten Lösungen sicherzustellen.

IDunion ist eine europäische Genossenschaft, die ein produktives, dezentrales Netzwerk für digitale Identitäten betreibt und maßgeblich an der Gestaltung der eIDAS-2.0-konformen Umsetzung in Deutschland beteiligt ist. Durch die Anbindung an dieses etablierte Netzwerk zielte 51nodes darauf ab, dass die im Projekt geschaffenen Identitäten und Nachweise nicht in einer isolierten Insellösung verbleiben, sondern nahtlos mit anderen SSI-basierten Diensten in Deutschland und Europa interagieren können.

Merkmal	**Gaia-X 4 moveID (51nodes-Ansatz)**	**MOBI VID Standard**
Governance-Modell	Offenes, föderiertes Ökosystem (Gaia-X-Prinzipien); Betonung des Zugangs für KMU.	Industriekonsortium, angeführt von großen OEMs und Technologieunternehmen.
Primärer technischer Fokus	Interoperable SSI-Infrastruktur für die Dienstautorisierung (z.B. Parken, Laden).	Standard für ein digitales „Geburtsdokument“ des Fahrzeugs und die Nachverfolgung seines Lebenszyklus (VIN on-chain).
Ziel-Anwendungsfälle	V2X-Dienstinteraktionen, automatisierte Zahlungen, Zugangskontrolle.	Fahrzeugprovenienz, Eigentümerhistorie, Lieferkette, nutzungsbasierte Versicherung.
Interoperabilitätsstrategie	Ausrichtung an paneuropäischen Standards (EUDI-Wallet, OID4VC) und Ökosystemen (IDunion).	Schaffung eines mobilitätsspezifischen Standards mit eigenem Ökosystem.

Tabelle 8: Vergleich moveID mit MOBI (Autoren: das moveID-Konsortium)

2.6 Veröffentlichungen

51nodes veröffentlichte in der Projektlaufzeit die Artikel aus Tabelle 9, die das Projektvorhaben und Arbeitsergebnisse von 51nodes aus dem Projekt dokumentieren und Interessierten zugänglich machten. Zudem wurde der „Mobility SSI Stack“ für mobilitätsbezogene Anwendungsfälle als Open Source-Software veröffentlicht.

Artikel	Zeitschrift / Blog / Repository	Datum	Autor(en)
moveID Component Landscape Evolves: Introducing Data Provenance and Offline SSI	moveID Blog	15.09.2025	Achim Klein
Mobility SSI Stack	https://github.com/51nodes/mobility-ssi	15.07.2025	Julian Voelkel
The Mobility Service Commerce Process	moveID Blog	07.03.2024	Achim Klein
moveID's Target Vision for an Open Digital Identity Infrastructure for Vehicles and Mobility Services in the Smart City	moveID Blog	10.10.2023	Achim Klein
Gaia-X project moveID releases component landscape	moveID Blog	31.01.2023	Achim Klein
"We work on the infrastructures to enable the decentralized crypto economy" – Jochen Kaßberger, 51nodes	moveID Blog	04.10.2022	Jochen Kaßberger

Tabelle 9: Veröffentlichungen von 51nodes im Rahmen des Projekts Gaia-X 4 moveID (Autor der Tabelle: Achim Klein)