

Swiss PV Circle

Arbeitspaket 1 – Datenbank

Betriebsmodell der Datenbank/Plattform für Secondhand-Photovoltaikmodule

Arbeitspaket-Nummer	AP1
Arbeitspaket-Titel	Datenbank
Arbeitspaket-Lead	Berner Fachhochschule
Deliverable-Nummer	AP1.1
Deliverable-Name	Betriebsmodell der Datenbank/Plattform für Secondhand-Photovoltaikmodule
Status	Finaler Bericht
Autorin	Ässia Boukhatmi
Verbreitungsebene	Öffentlich
Veröffentlichungsdatum	16.06.2025

Inhalt

Executive Summary	2
1. Einführung	3
2. Datengrundlage	4
2.1 Datenquellen	4
2.2 Datenaufbereitung	5
3. Datenbankentwicklung	6
3.1 OpenAPI-Standard	6
3.2 Aufbau Datenbank	7
4. Operationalisierung	9
4.1 Plattform Prototyp	10
4.2 Zukünftige Weiterentwicklung	11
5. Fazit	12
Literatur	14

Executive Summary

Der rasche Ausbau der Photovoltaik (PV) zur Unterstützung des Klimawandels wird voraussichtlich zu einem erheblichen Anstieg der Altmodule führen. Um die wachsenden Abfallströme zu bewältigen und die Ressourceneffizienz zu fördern, stellt die Kreislaufwirtschaft ein Wirtschaftsmodell dar, das auf die Schaffung zirkulärer Materialströme abzielt. Digitale Technologien, darunter fallen zum Beispiel Digitale Produktpässe (DPP), sind ein vielfach diskutierter Treiber der Kreislaufwirtschaft, da sie den Stakeholder:innen der Solarindustrie wichtige Informationen zu installierten PV-Anlagen zur Verfügung stellen, um verbesserte Entscheidungen über Wiederverwendungspraktiken treffen zu können. Auch wenn der DPP in den vergangenen Jahren industrieabhängig zu hoher Bekanntheit gelangte, wird häufig ausser Acht gelassen, dass dieser auf einer Datenbank fusst, welche die relevanten Daten zum Produktlebenszyklus sammelt und aktualisiert, sowie einer digitalen Plattform, welche den Datenaustausch zwischen relevanten Akteur:innen ermöglicht und mit Hilfe von 'Value Added Services' ökonomisch incentiviert. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Arbeitspakets 1 im Projekt Swiss PV Circle die Grundlage für die zukünftige Implementierung eines Digitalen Produktpasses für PV-Module geschaffen. Diese Bestrebung beinhaltet mehrere Teilaspekte, darunter die Sammlung und Aufbereitung von Daten aus verschiedenen öffentlichen und nicht-öffentlichen Datenquellen innerhalb der Schweiz, sowie die Entwicklung einer Datenbank, gestützt durch den OpenAPI Standard, um spätere Anpassungen und Ergänzungen zu ermöglichen. Darüber hinaus wurden ein erstes Konzept für die Operationalisierung der Plattform, sowie ein Prototyp für die Visualisierung der Daten in Form eines DPPs entwickelt. Das Konzept beinhaltet weiterhin ein mögliches Geschäftsmodell für die Plattform, welches in Absprache mit den Projektpartner:innen und weiteren Stakeholdern der Solarindustrie entwickelt wurde. Aufgrund der Einhaltung von Datenschutzrichtlinien werden die verwendeten Daten der Öffentlichkeit nicht zur Verfügung gestellt.

1. Einführung

Digitale Technologien spielen eine entscheidende Rolle bei der Transformation hin zu einer Kreislaufwirtschaft, indem sie den Informationsfluss entlang der Wertschöpfungsketten verbessern und datengetriebene Entscheidungen ermöglichen. Zu den zentralen Technologien gehören digitale Plattformen, die als Vermittler zwischen verschiedenen Akteuren fungieren und Transaktionen sowie die gemeinsame Nutzung von Ressourcen fördern. Diese Plattformen unterstützen zirkuläre Geschäftsmodelle, indem sie Transparenz schaffen, den Austausch von Produkten und Materialien erleichtern und die Wiederverwendung fördern. Ergänzend dazu bieten Datenbanken eine leistungsfähige Infrastruktur für die strukturierte Erfassung und Verwaltung von Produkt-, Prozess- und Lebenszyklusdaten. Durch die Kombination verschiedener digitaler Technologien wie digitalen Produktpässen mit Analysetechniken lassen sich umfassende Informationen über Produkte und deren Zustand sammeln, die wiederum die Entwicklung effizienter Strategien zur effizienten Wiederverwendung, Refurbishment und zum Recycling unterstützen.¹

Datenbanken sind strukturierte Systeme zur Speicherung, Verwaltung und Abfrage grosser Mengen an Informationen. Sie ermöglichen es, Daten in organisierter Form zu speichern und auf effiziente Weise zu verarbeiten. Eine relationale Datenbank, eines der am häufigsten verwendeten Modelle, organisiert Daten in Tabellen mit Zeilen und Spalten, die miteinander verknüpft werden können. Diese Struktur erlaubt komplexe Abfragen, das Zusammenführen von Informationen aus verschiedenen Tabellen und die konsistente Verwaltung von Daten.²

Digitale Produktpässe (DPPs) umfassen und zentralisieren standardisierte Daten über Produkte entlang ihres gesamten Lebenszyklus. Sie enthalten Informationen zu Materialzusammensetzung, Herkunft, Gebrauch, Reparaturmöglichkeiten und end-of-life Optionen wie Wiederverwendung oder Recycling.³ Ziel der digitalen Produktpässe ist es, die Transparenz in der Wertschöpfungskette zu erhöhen und zirkuläre Strategien durch verbesserte Nachverfolgbarkeit und datenbasierte Entscheidungen zu fördern

Digitale Plattformen spielen eine zentrale Rolle in der Umsetzung der digitalen Kreislaufwirtschaft, indem sie verschiedene digitale Technologien (bspw. Datenbanken, DPPs und Datenanalysetechniken) vernetzen und die Zusammenarbeit sowie Innovation zwischen unterschiedlichen Akteuren fördern.⁴ Ein entscheidender Erfolgsfaktor für Plattformen ist der Netzwerkeffekt, der besagt, dass der Wert einer Plattform mit der Anzahl ihrer Nutzer steigt. Digitale Plattformen finden sich in verschiedenen Kontexten, sei es innerhalb eines Unternehmens, zwischen Unternehmen oder branchenübergreifend in Wertschöpfungsketten und Ökosystemen.⁵ Während marktvermittelnde Plattformen vor allem den Austausch von Produkten und Dienstleistungen in multi-seitigen Märkten ermöglichen, bieten Plattform-Ökosysteme umfassendere

¹ Boukhatmi, Nyffenegger, and Grösser, "Designing a Digital Platform to Foster Data-Enhanced Circular Practices in the European Solar Industry"; Pagoropoulos, Pigosso, and McAloone, "The Emergent Role of Digital Technologies in the Circular Economy"; Kristoffersen et al., "The Smart Circular Economy"; Bressanelli et al., "Exploring How Usage-Focused Business Models Enable Circular Economy through Digital Technologies"; Chauhan, Parida, and Dhir, "Linking Circular Economy and Digitalisation Technologies."

² Elmasri and Navathe, *Fundamentals of Database Systems*.

³ Boukhatmi, Nyffenegger, and Grösser, "Designing a Digital Platform to Foster Data-Enhanced Circular Practices in the European Solar Industry"; Walden, Steinbrecher, and Marinkovic, "Digital Product Passports as Enabler of the Circular Economy"; Honic, Kovacic, and Rechberger, "Concept for a BIM-Based Material Passport for Buildings."

⁴ Autio, "Orchestrating Ecosystems"; Bonina et al., "Digital Platforms for Development."

⁵ Thomas, Autio, and Gann, "Architectural Leverage."

Möglichkeiten zur Wertschöpfung durch ihre Offenheit und Innovationskraft.⁶ Um Plattformen ökonomisch tragbar zu machen und deren Nutzergruppen dazu anzutreiben, Daten im Sinne der Kreislaufwirtschaft freizugeben und auszutauschen, ist ein gutes Serviceportfolio ('Value Added Services') von tragender Relevanz. Plattform-Services bezeichnen die zentralen Aktivitäten und Funktionen, die die Plattformarchitektur mit ihren Nutzer:innen verbinden und so die gemeinsame Wertschöpfung im Plattformökosystem ermöglichen.⁷

Nachfolgend werden die im Projekt erzielten Ergebnisse hinsichtlich des Einsatzes von Datenbanken, DPPs und digitalen Plattformen vorgestellt.

2. Datengrundlage

2.1 Datenquellen

Die für diese Studie verwendeten Daten stammten aus vier Hauptquellen. Erstens haben wir einen öffentlichen Datensatz des Portals Opendata.Swiss verwendet, welcher regelmässig vom Bundesamt für Energie (BFE) herausgegeben wird. Der Datensatz enthält die im Schweizer Herkunftsnachweissystem registrierten Stromproduktionsanlagen mit Standort, Installationsdatum, installierter Leistung und PV-Anlagentyp. Bis Ende umfasste dieser Datensatz rund 225'000 PV-Anlagen mit einem Alter zwischen 0 und 35 Jahren.⁸

Die zweite, nicht-öffentliche Datenquelle, die vom BFE gemeinsam mit Pronovo im Rahmen des Projekts Swiss PV Circle zur Verfügung gestellt wurde, umfasst fünfzehn Zeitreihendatensätze, welche die monatliche Energieproduktion jeder PV-Anlage zwischen 2009 und 2023 aufzeigen. Weitere Datensätze des BFE, die für die Entwicklung der Datenbank berücksichtigt wurden, umfassen Informationen zur Ausrichtung, Neigungswinkel, wie Anlagenerweiterungen jeder Produktionseinheit. Weiterhin wurde ein Datensatz mit den seit 2021 digital getrackten Modultypen berücksichtigt, wodurch ein zusätzlicher, relevanter Datentyp für die Erarbeitung der Datenbank aufgenommen werden konnte. Ebenfalls in den BFE-Daten enthalten war ein Datensatz, der die Übersetzungen von Pronovo-Identifikationsnummern (KEV/EIV/MKF/HKN-Nummer) zu öffentlichen Geo-Portal-IDs ermöglicht. Dies ist relevant, um interne, nicht-öffentliche Anlagendaten mit denen der öffentlichen (bspw. aus dem Herkunftsnachweissystem) zu verknüpfen.

Eine weitere nicht-öffentliche Quelle, die vom Schweizer Recyclingsystem SENS eRecycling und Partner des Swiss PV Circle Projekts zur Verfügung gestellt wurde, umfasst alle Abholaufträge von 2017 bis Juni 2024, die von Unternehmen oder Sammelstellen für die Abholung und das Recycling von end-of-life PV-Modulen angefordert wurden.⁹ Der Datensatz enthält die Abholadresse, das Datum, die Menge (kg), den PV-Modultyp, den Modulzustand und den end-of-life Grund jedes Abholauftrags.

Darüber hinaus konnten zwei Datensätze mit den Reuse-Testingdaten aus den im Projekt durchgeführten Pilotstudien in die Entwicklung der Datenbank eingebunden werden. Diese Datensätze beinhalten hauptsächlich alle Testdaten, beispielsweise die gemessene Residualleistung der Module,

⁶ Parker, Alstynne, and Choudary, *Platform Revolution*; Tiwana, *Platform Ecosystems*.

⁷ Aarikka-Stenroos, Ritala, and Thomas, "Circular Economy Ecosystems"; Adner, "Ecosystem as Structure."

⁸ Opendata.Swiss, "Electricity Production Plants - Opendata.Swiss."

⁹ SENS eRecycling, "Recyclingsystem von Photovoltaik in der Schweiz."

Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom, Füllfaktor und die für die Messung verwendeten Prüfparameter (Bestrahlungsstärke, Lufttemperatur, etc.).

Diese Datensätze bieten die Grundlage, um möglichst viele Phasen der Wertschöpfung von PV-Modulen mit derzeit verfügbaren Daten abzudecken. Während bestehende DPP-getriebene Datenmodelle das 'Best-Case-Scenario' definieren,¹⁰ ist der hier gewählte Ansatz mit der Realität abgeglichen, strebt dennoch an, den grösstmöglichen Informationsgehalt aus den zur Verfügung stehenden Daten abzuleiten.

2.2 Datenaufbereitung

Die Datenaufbereitung war ein zentraler Schritt zur Sicherstellung der Datenqualität und der Konsistenz der verschiedenen Datensätze, die zum Aufbau der Datenbank verwendet wurden. Da die Daten aus unterschiedlichen öffentlichen und nicht-öffentlichen Quellen stammten, wurden sie zunächst untersucht und die einzelnen Datentypen interpretiert. Dies umfasste die Bereinigung von fehlenden Werten, die Beseitigung von Duplikaten sowie die Harmonisierung der Bezeichnungen von PV-Anlagen, Modultypen und Identifikationsnummern über alle Quellen hinweg. Nähere Erläuterungen für die zukünftige Anpassungen der Daten und Informationssysteme sind ausführlich dokumentiert (siehe Deliverable 1.2).

Ein weiterer wichtiger Teil der Datenaufbereitung war die Verknüpfung der Pronovo-Identifikationsnummern mit den öffentlichen Geo-Portal-IDs, um interne, nicht-öffentliche Daten mit öffentlich zugänglichen Informationen zu kombinieren. Zudem wurden die Zeitreihendaten der monatlichen Energieproduktion und der Abholaufträge von end-of-life PV-Modulen so aggregiert, dass sie über alle Jahre hinweg vergleichbar und analysierbar waren.

Für die Testdaten der Reuse-Pilot-Cases wurde Augenmerk auf die Konvertierung der Messparameter gelegt, um sicherzustellen, dass wichtige Informationen, wie etwa die Residualleistung, die Leerlaufspannung, der Kurzschlussstrom und der Füllfaktor der PV-Module aus den bestehenden Datenquellen korrekt interpretiert und in der Datenbank abgebildet werden konnten. Schliesslich wurden alle Datensätze auf Inkonsistenzen geprüft, die durch manuelle Eingaben entstanden sein könnten, und bei Bedarf Anpassungsvorschläge dokumentiert (siehe Deliverable 1.2).

Für weitere Analysen wurden zusätzlich noch alle bisher digital getrackten PV-Modultypen ausgewertet, da die Eingabe der Herstellertyp-Bezeichnung über ein Freitextfeld erfolgt. Die Analyse umfasst etwa 93'000 Anlagen, von denen etwa 80'000 ausgewertet werden konnten. Abbildung 1 zeigt die Übersicht der ausgewerteten PV-Modultypen. Wichtig hierbei ist zu erwähnen, dass Abweichungen dieser Ergebnisse aufgrund der Vielzahl von Anlagen mit nicht referenzierbaren Modultypen vorhanden sein können. Weiter gilt zu beachten, dass der Grossteil von PV-Installationen durch angebaute Aufdachanlagen abgedeckt ist.

¹⁰ Boukhatmi, Nyffenegger, and Grösser, "Designing a Digital Platform to Foster Data-Enhanced Circular Practices in the European Solar Industry."

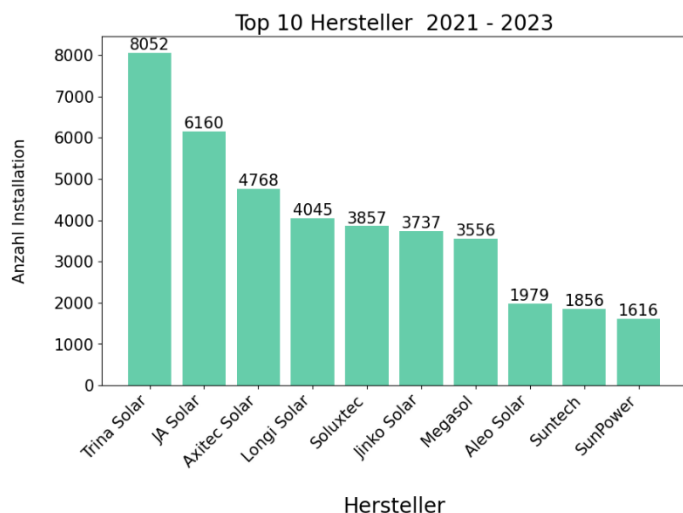


Abbildung 1: Top 10 installierte Modulhersteller 2021 – 2023, welche über das Pronovo-Portal bei Anlagenanmeldung im Freitextfeld angegeben wurden.

3. Datenbankentwicklung

Die Entwicklung einer robusten und skalierbaren Datenbank bildet das Fundament für die spätere Implementierung eines digitalen Produktpasses (DPP) für PV-Module. Um zirkuläre Wertschöpfungsketten in der Solarindustrie zu fördern, ist eine umfassende und konsistente Datenbasis erforderlich, die sämtliche relevanten Informationen über den gesamten Lebenszyklus von PV-Anlagen abdeckt – von der Installation über den Betrieb bis hin zur Stilllegung und möglichen Wiederverwendung.

Nachfolgend wird die Konzeption der Datenbank beschrieben, welche die gesammelten Daten aus den genannten Quellen integriert. Dabei wird auf den Einsatz von Frameworks zur Verbesserung der Interoperabilität verschiedener Informationssysteme (wie dem OpenAPI-Standard) eingegangen, der die Entwicklung und spätere Erweiterung der Datenbank erleichtert. Zudem wird erläutert, wie verschiedene Datensätze, etwa zur Energieproduktion, zu end-of-life PV-Modulen und zu Reuse-Tests, aufbereitet und verknüpft wurden, um eine breite Abdeckung der Wertschöpfungskette zu gewährleisten.

Diese Datenbank dient nicht nur als zentrales Informationssystem für den DPP, sondern bietet durch ihre flexible Struktur auch die Möglichkeit, zukünftig weitere Datenquellen zu integrieren und weitere 'Value Added Services' zur Unterstützung zirkulärer Praktiken zu entwickeln.

3.1 OpenAPI-Standard

Der OpenAPI-Standard ist ein weit verbreitetes Framework zur Spezifikation von RESTful APIs (Representational State Transfer Application Programming Interfaces), das es ermöglicht, Schnittstellen von Webservices auf strukturierte und einheitliche Weise zu definieren. Er unterstützt Entwickler:innen bei der Erstellung und Dokumentation von APIs, indem er eine maschinen- und menschenlesbare Beschreibung bereitstellt. Durch die Nutzung des OpenAPI-Standards können automatisiert Client-SDKs, Mock-Server sowie umfassende API-Dokumentationen generiert werden, was die Entwicklung, Erweiterung und Wartung datenbankgestützter Plattformen erheblich vereinfacht. Dies ist besonders relevant im Kontext des DPPs, da

hier eine flexible und skalierbare Datenbankarchitektur benötigt wird, um Produktinformationen kontinuierlich zu erfassen, zu aktualisieren und für verschiedene Akteur:innen zugänglich zu machen.¹¹

Im Rahmen des Arbeitspakets 1 innerhalb von Swiss PV Circle wurde eine umfassende OpenAPI-Dokumentation erstellt, die das Datenbankschema für die Verwaltung von Informationen zu PV-Anlagen beschreibt. Die Spezifikation folgt dem OpenAPI-Standard in Version 3.0.3 und definiert detailliert die verfügbaren Endpunkte sowie die zugehörigen Datenschemata. Die erfassten Daten umfassen technische Parameter wie Seriennummern, Leistungswerte und Modultypen sowie logistische Informationen wie die Anlagenadresse. Um die Relevanz der erfassten Attribute für die Datenbank klar zu kennzeichnen, enthält die Dokumentation entsprechende Metainformationen. Darüber hinaus wurde das Schema so gestaltet, dass spätere Erweiterungen und Anpassungen problemlos möglich sind. Die OpenAPI-Dokumentation stellt damit einen wichtigen Baustein für die zukünftige Implementierung eines DPPs dar, der den Datenaustausch zwischen Akteuren der Solarindustrie erleichtert und eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft unterstützt.

3.2 Aufbau Datenbank

Für den Aufbau der Datenbank wurde SQLite verwendet, eine leichtgewichtige, serverlose Datenbank-Engine, die sich insbesondere für eingebettete Anwendungen eignet. SQLite wurde verwendet, da sie eine unkomplizierte und ressourcenschonende Lösung darstellt, die keine zusätzliche Serverkonfiguration benötigt. Dadurch eignet sie sich ideal für Projekte, bei denen Flexibilität und rasche Prototypenentwicklung im Vordergrund stehen. Zweitens bietet SQLite vollständige SQL-Unterstützung und ermöglicht dadurch die einfache Integration und Abfrage komplexer Datensätze. Drittens zeichnet sich SQLite durch seine hohe Zuverlässigkeit und weit verbreitete Akzeptanz aus, wodurch spätere Migrationen zu anderen Datenbanksystemen möglich sind. Diese potenzielle Migration wird durch den Open-API Standard gestützt, welcher einen Wechsel zu anderen Datenbank-Systemen vereinfacht.

Die Datenbank wurde so aufgebaut, dass sie mehrere miteinander verknüpfte Tabellen enthält, welche die unterschiedlichen Phasen der PV-Wertschöpfung abbilden (siehe Abbildung 2, wobei zukünftig zu erweiternde Datentypen in grün markiert sind). Zu den zentralen Tabellen (nicht abschliessend) gehören:

- **Produktionseinheiten:** Diese Tabelle speichert grundlegende Informationen zu den registrierten PV-Anlagen wie Standort, Installationsdatum und installierte Leistung bei Erstinbetriebnahme inklusive Erweiterungen. Für die Erschliessung von Wiederverwendungsgeschäftsmodellen sind diese Informationen relevant zur Bestimmung des Anlagenalters und des Installationsorts. Basierend auf den Ergebnissen im Arbeitspaket 3 «Forecasting» könnten ausserdem Datenanalysetechniken diese Informationen mit weiteren Aussagen zum Reuse-Potenzial anreichern. Weiterhin wäre die Ergänzung der Mindestbetriebsdauer (auf Basis der Förderungsart) ein wichtiger Baustein, um Rückschlüsse darüber zu ermöglichen, ab wann eine Deinstallation rechtlich möglich wäre. Ebenfalls hilfreich hinsichtlich verbessertem Datenmanagement wäre die Ergänzung um den 'Grund für die Erweiterung', um mögliche Modulwechsel (bspw. bei vorzeitigen Schäden oder Repowerings) besser nachvollziehen zu können (siehe Deliverable 1.2).
- **Eingespeiste Energie:** Hier werden die monatlichen Zeitseriendaten zur Energieproduktion der einzelnen Anlagen zwischen 2009 und 2023 erfasst, einschliesslich der Anteile der selbst genutzten

¹¹ OpenAPI Initiative, "OpenAPI Specification - Version 3.1.0 | Swagger."

und in das Netz eingespeisten Energie. Anomalien in der Energieproduktionen und Veränderungen im Ertrag der Anlage können Rückschlüsse auf mögliche Modulwechsel und mögliche Stilllegungen geben, was ein wichtiger Schlüssel zur Erweiterung des end-of-life Datenbestands (siehe Arbeitspaket 3 «Forecasting») ist.

- **Abholauftrag:** Diese Tabelle umfasst die Daten zu den Abholaufträgen der end-of-life Module, einschliesslich Menge, Abholadresse, PV-Modultyp, Zustand der Module und Entsorgungsgrund. Auch diese Informationen sind wichtig für die Erweiterung des aktuellen Datenbestands zu end-of-life Anlagen, aber auch für die Entwicklung von Entscheidungshilfen, um eine verbesserte Triage zwischen Recycling und Reuse zu ermöglichen (siehe Arbeitspaket 2 «Geschäftsmodell» sowie Arbeitspaket 3 «Forecasting»).
- **Test Reuse:** Diese Tabellen enthalten die Testdaten der beiden durchgeführten Pilotprojekte zur Wiederverwendung, darunter die Seriennummern einzelner Module sowie gemessene Testparameter wie Testdatum, Residualleistung, Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom und Füllfaktor. Diese Daten sind essenziell für die Beurteilung der Wiederverwendbarkeit von PV-Modulen und für die mögliche zukünftige Erstellung eines 'Reuse-Zertifikats', welche die Wiederverwendung der Module garantiert (siehe Arbeitspaket 2 «Geschäftsmodell»).
- **Ausrichtung:** Diese Tabelle enthält weitere Informationen zur Ausrichtung der Anlage, inklusive Neigungswinkel und Art der Erweiterungen. Diese Daten sind nicht primär relevant für die Wiederverwendung, aber können den Informationsgehalt jeder Anlage weiter anreichern.
- **PV-Module (Typ):** Diese Tabelle enthält für die ab 2021 installierten Anlagen den angemeldeten Modultyp und die Anzahl der Module pro Anlagenteil. Für die Wiederverwendung ist diese Information von besonders hoher Relevanz, da der Modultyp Rückschluss auf das Datenblatt ermöglicht, wodurch bereits für den Abbau/Testing der Module wichtige physikalische und elektrische Eigenschaften der Module (Wp-Performance, Gewicht, Masse) und eine potenzielle Degradation auf Basis der Installationszeit abgeleitet werden können (siehe Arbeitspaket 2 «Geschäftsmodell»).
- **GEO Portal ID:** Diese Tabelle dient der Verknüpfung interner Identifikationsnummern (KEV/EIV/MKF/HKN) mit den öffentlichen Geo-Portal-IDs, um eine nahtlose Integration von öffentlichen und nicht-öffentlichen Datensätzen zu ermöglichen.
- **ElectricityProductionPlant:** Diese Tabelle enthält alle Informationen aus dem öffentlichen Datensatz «Elektrizitätsproduktionsanlagen», welcher regelmässig über Opendata.Swiss aktualisiert und veröffentlicht wird. Die Daten sind grösstenteils redundant mit jenen aus der Tabelle 'Produktionseinheiten'. Relevant hierbei ist jedoch, dass diese Daten öffentlich verfügbar sind und dadurch Potenzial bergen für eine projektunabhängige Umsetzung von zirkulären Geschäftsmodellen. Die Erweiterung um den Modultyp wäre eine relevante Ergänzung dieses Datensatzes (siehe Arbeitspaket 3 «Forecasting»).

Die Struktur der Datenbank wurde so gestaltet, dass sie eine klare und nachvollziehbare Datenorganisation ermöglicht. Relationen zwischen den Tabellen erlauben die Verknüpfung der Datensätze über Primär- und Fremdschlüssel, welche im Rahmen der OpenAPI-Dokumentation erfasst wurden. Darüber hinaus erleichtert die Nutzung von SQLite die spätere Erweiterung der Datenbank um weitere Tabellen und Attribute, etwa zur Integration neuer Datensätze oder zusätzlicher Informationen zu PV-Anlagen. Insgesamt ermöglicht der

gewählte Aufbau eine effiziente Speicherung, Abfrage und Verarbeitung der Daten, wodurch sowohl bestehende als auch zukünftige Anforderungen an den DPP abgedeckt werden können.

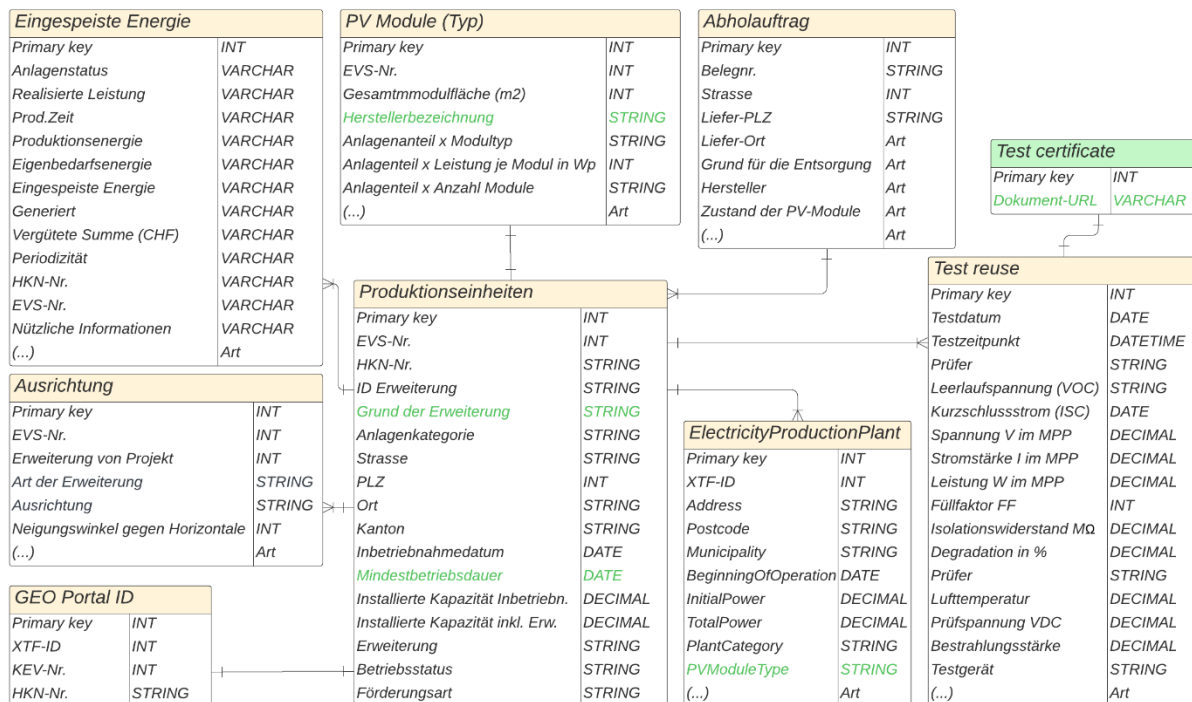


Abbildung 2: ER-Schema der Datenbank unter Berücksichtigung der wichtigsten Entities und Datentypen. Zukünftige Empfehlungen für weitere Datentypen sind grün markiert. Die Daten bieten die Grundlage für die Entwicklung des DPPs.

Abbildung 3 zeigt die einzelnen Tabellen und Attribute des Datenbankschemas in SQLite. Die Namen der Tabellen wurden so weit möglich aus der Originalbezeichnung der einzelnen Datensätze übernommen, um eine zukünftige Zuweisung zu erleichtern.

Name	Type	Schema
20240218_EINGESPEISTE-ENERGIE_(y...	CREATE TABLE	"20240218_EINGESPEISTE-ENERGIE_(year)" ("Name der Produktionsanlage" TEXT, "Anlagenstat
2024_04_30_RC_202405231547	CREATE TABLE	"2024_04_30_RC_202405231547" ("Serial number" TEXT, "DateTime Started" TEXT, "PV-module
Ausrichtung	CREATE TABLE	"Ausrichtung" ("EVS-Nr." INTEGER, "Erweiterung von Projekt" TEXT, "Anlagen-ID" INTEGER, "Su
ElectricityProductionPlant	CREATE TABLE	"ElectricityProductionPlant" ("xtf_id" INTEGER, "Address" TEXT, "PostCode" INTEGER, "Municipali
GEO-Portal-ID	CREATE TABLE	"GEO-Portal-ID" ("Bezeichnung" TEXT, "ID" INTEGER, "Laufnummer" TEXT, "EVS-Nr." TEXT)
KEV-EIV-Anlagen	CREATE TABLE	"KEV-EIV-Anlagen" ("EVS-Nr." TEXT, "Erweiterung von Projekt" TEXT, "Technologie" TEXT, "Kate
Messprotokolle n PV-Module	CREATE TABLE	"Messprotokolle n PV-Module" ("Seriennummer" TEXT, "Sichtkontrolle. Stecker, Backsheet, Glas...
PV Module	CREATE TABLE	"PV Module" ("EVS-Nr." INTEGER, "Gesamtmodulfläche (m2)" INTEGER, "Anlagenanteil 1 Modultyp
Produktionseinheiten	CREATE TABLE	"Produktionseinheiten" ("EVS-Nr." TEXT, "HKN-Nr" TEXT, "Erweiterung von Projekt" TEXT, "Stras
year_Auszug_SENS-Abholaufträge	CREATE TABLE	"year_Auszug_SENS-Abholaufträge" ("Belegnr." TEXT, "Kundenr." TEXT, "Artikelnr." INTEGER, "A

Abbildung 3: Screenshot der SQLite-Datenbank. Die Tabellen '2024_04_30_RC_202405231547' und 'Messprotokolle n PV-Module' enthalten die Testdaten der beiden Pilotprojekte, welche im Rahmen von AP2 durchgeführt wurden.

4. Operationalisierung

In den vorherigen Kapiteln lag der Schwerpunkt hauptsächlich auf der Sammlung und Aufbereitung der Daten sowie der Entwicklung der Datenbank. Diese beschriebenen Teilprozesse sollen zukünftig automatisiert mittels OpenAPI Standard und vordefinierten Regeln die Einbettung weiterer Inputs ermöglichen, welche sowohl unterschiedliche File-Formate wie Datenquellen einschliesst. Die Prozessierung und Vereinheitlichung aller Dateninputs ermöglichten die kontinuierliche Ergänzung und Weiterentwicklung der Datenbank, welche den Output dieses Datenflussprozesses darstellt, wie in **Fehler! Verweisquelle konnte**

nicht gefunden werden. auf der linken Seite zusammengefasst wurde. Auf der rechten Seite hingegen wird die zukünftige Plattformentwicklung beschrieben, welche den Datenzugriff und Austausch für Akteur:innen der Schweizer Solarindustrie ermöglichen sollen. Über das Interface der Plattform, welche über ein Web-Framework (hier exemplarisch Django oder FastAPI) aufgebaut wird, können die relevanten Daten zu jeder PV-Anlage in Form des DPPs abgebildet werden. Weitere neue Daten können ebenfalls über die Interface durch Nutzer:innen oder über eine API (bspw. Wetterdaten oder Abholaufträge) eingespeist und in der Datenbank aufgenommen werden. Weiterhin könnten Datenanalysetechniken (siehe Arbeitspaket 3 «Forecasting») in der Plattform verbesserte Aussagen zur Kreislauffähigkeit einzelner Anlagen ermöglichen und als weitere Information im DPP getrackt werden. CSV-Exports der Daten könnten ebenfalls den Zugriff und die Weiterverarbeitung der Daten, zum Beispiel für Unternehmen im Reuse- oder Recyclingbereich, vereinfachen.

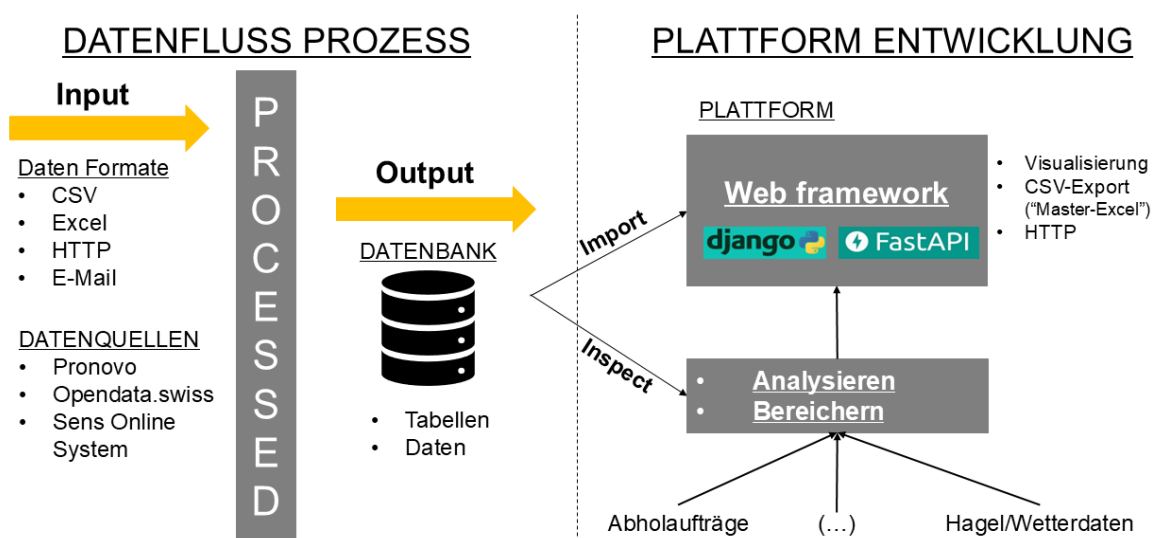


Abbildung 4: Schema der Plattform Operationalisierung. Auf der linken Seite sind die Datenflussprozesse dargestellt, welche die kontinuierliche Aktualisierung der Datenbank sicherstellen. Auf der rechten Seite ist die Plattformentwicklung mittels Web-Framework und Anreicherung weiterer Datenquellen (durch Nutzer:innen und APIs) und Anwendung von Datenanalysetechniken abgebildet.

4.1 Plattform Prototyp

Zum Abschluss des Projekts konnte ein erster Prototyp der Plattform entwickelt werden, der die angestrebte Vision des Digitalen Produktpasses in vereinfachter Form visualisiert. Beim Aufrufen der Website erscheint zunächst eine Kartenansicht der Schweiz mit drei Markern. Zwei dieser Marker (die Regionen Arlesheim und Genf) repräsentieren die Pilotstandorte des Projekts. Für diese wurden nicht nur Tests zur Wiederverwendung durchgeführt, sondern auch sämtliche relevanten Lebenszyklusdaten erhoben, konsolidiert und übersichtlich dargestellt.

Ein Klick auf die Marker öffnet detaillierte Informationen zu den Anlagen, darunter die Identifikationsnummern, der (anonymisierte) Standort, das Inbetriebnahmedatum, der Produkttyp, die Anlagenkategorie, der aktuelle Status, die Art der Förderung sowie die installierte Leistung. Über den Reiter «Diagramm anzeigen» lassen sich zudem Produktionsdaten aus verschiedenen Jahren einsehen und herunterladen.

Ein zentrales Element des Prototyps sind die Testergebnisse, bei denen unterschiedliche Verfahren für die beiden Pilotanlagen zum Einsatz kamen. Diese sind unter dem Menüpunkt «Testverfahren» aufgeführt. Unter «Modultabelle anzeigen» können die Testdaten auf Seriennummernbasis individuell ausgewählt und tabellarisch dargestellt werden. Perspektivisch könnte an dieser Stelle auch das entsprechende Testzertifikat abrufbar sein, um eine qualitätsgesicherte Wiederverwendung, beispielsweise durch eine öffentlich anerkannte Instanz wie Swissolar, zu gewährleisten. Darüber hinaus ist geplant, über den Button «Module kaufen» getestete PV-Module künftig direkt über einen Online-Marktplatz verfügbar zu machen.

Ein dritter Use Case zeigt eine noch installierte PV-Anlage in der Region Landquart. Auch hier sind die statischen Anlagendaten sowie die zugehörige Produktionstabelle einsehbar. Im Unterschied zu den Pilotanlagen erscheinen jedoch keine Testergebnisse. Stattdessen gibt es einen Button «Module für Reuse freigeben», über den zukünftig eine Weiterleitung zum Abholssystem von SENS ermöglicht werden soll.

Der Prototyp ist unter folgender Website verfügbar:

<https://swiss-pv.onrender.com/>

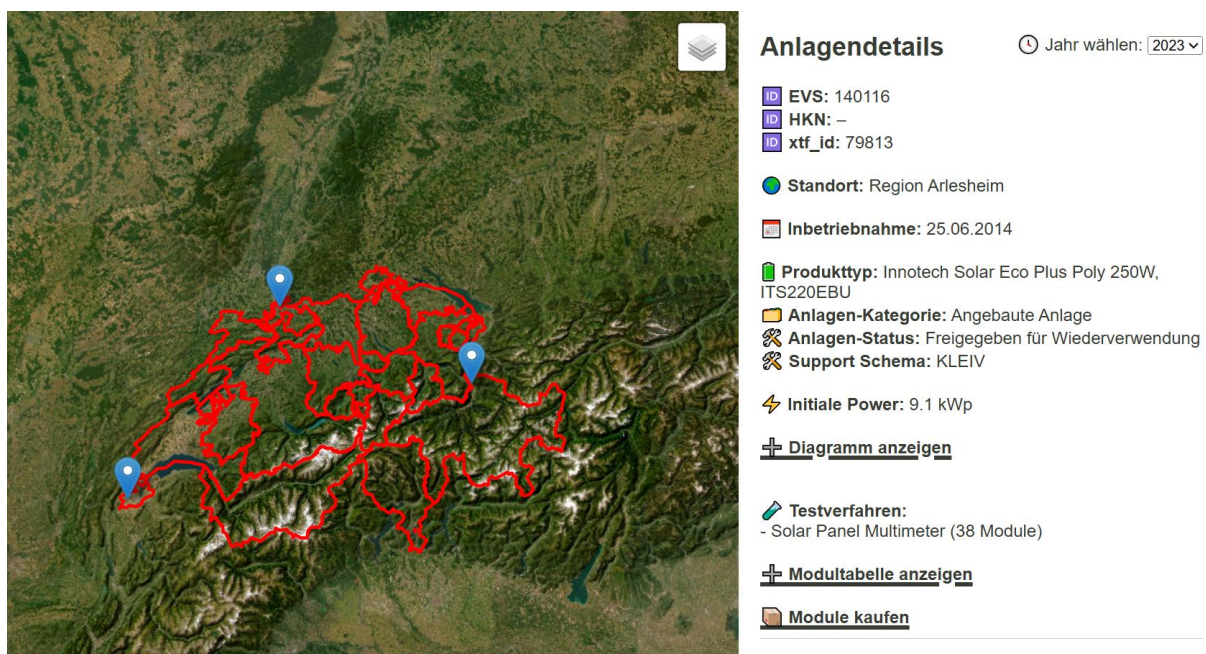


Abbildung 5: Screenshot des Plattform-Prototyps.

4.2 Zukünftige Weiterentwicklung

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse sollen die zukünftige Weiterentwicklung der Plattform ermöglichen und weiter antreiben. Wie sich im Rahmen aller Arbeitspakete des Swiss PV Circle Projekts deutlich gezeigt hat, sind Daten ein wichtiger Treiber für die Anwendung von Geschäftsmodellen im Bereich der Wiederverwendung, da sie frühzeitige Entscheidungen über das Reuse-Potenzial von PV-Anlagen ermöglichen. Ein Online-Marktplatz stellt darüber hinaus das geeignete Intermediär dar, um den zukünftigen Wiederverkauf getesteter PV-Module effizient zu gestalten und durch ein Testzertifikat abzusichern. Die Grundlage hierfür bildet der digitale Produktpass (siehe *Abbildung*), welcher alle relevanten Daten zu PV-Anlagen aus verschiedenen Quellen zentralisiert und diese über die Plattform für alle Akteur:innen der Branche zugänglich macht. Weitere Value Added Services, beispielsweise die Berechnung des CO₂-

Footprints einer Reuse-Anlage oder ein Reporting-Tool für die Einhaltung regulatorischer Vorschriften, könnten die ökonomische Tragfähigkeit der Plattform und die steigende Nachfrage der Branche nach einer effizient dokumentierten Nachhaltigkeit sicherstellen.¹² Für die Nutzung der Plattform Services ist eine Software-as-a-Service (SaaS) Lösung (z.B. License Subscription) angedacht, während der Reuse Marktplatz frei zugänglich sein sollte, um die potenzielle Nutzer:innen-Basis zu erhöhen und damit die Generierung von Netzwerkeffekten zu ermöglichen.¹³

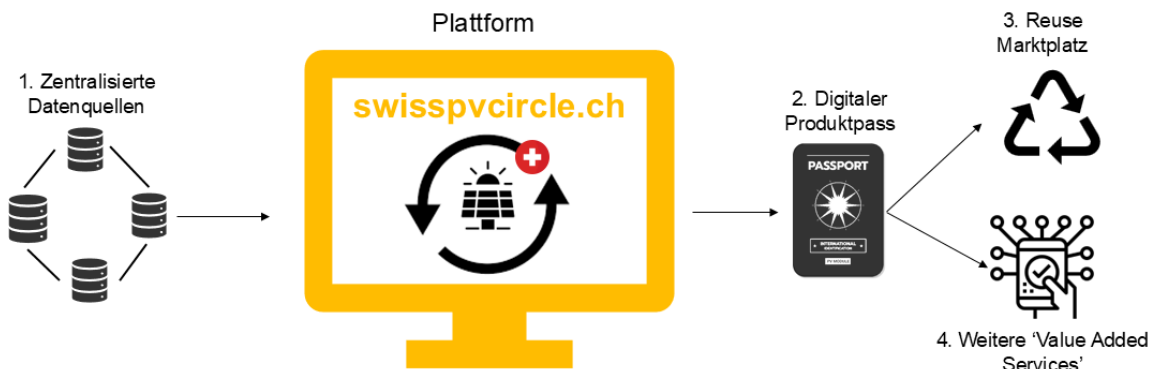


Abbildung 6: Skizze der wichtigsten Komponenten der zukünftigen Plattform (exemplarische Bezeichnung als 'swisspvcircle.ch').

Noch ungeklärt ist die Frage nach der Datenhoheit und der Ownership der Plattform. Im Gespräch mit allen Projektpartner:innen zeigte sich, dass das Hosting über SENS eRecycling oder Swissolar eine mögliche Option ist, da diese Organisationen die notwendige Neutralität aufweisen, um Vertrauen in der Solarbranche zu schaffen. Zudem könnte ein neutraler und anerkannter Akteur aus der Solarbranche besser dazu beitragen, Unternehmen zur Bereitstellung ihrer Daten auf der Plattform zu motivieren. Weiterhin ist die Inbezugnahme fester Partner für das Testing und die Rezertifizierung alter Module mit Reuse-Potenzial ein wichtiger Baustein, um den Marktplatz regelmässig mit neuen Angeboten innerhalb der Schweiz füttern zu können. Die Erarbeitung dieser Partnerschaften und die Weiterentwicklung der Value Added Services, basierend auf aktuellen Marktbedürfnissen, wird ein wichtiger Bestandteil zukünftiger Initiativen sein.

5. Fazit

Dieser Bericht fasste die wichtigsten Inhalte zur Datenbankentwicklung und den ersten Konzeptionierungen für eine zukünftige Plattformentwicklung innerhalb von Arbeitspaket 1 des Swiss PV Circle Projekts zusammen. Vor allem die Sammlung und Aufbereitung der Daten in der Schweiz verdeutlichte, dass die Entwicklung eines digitalen Produktpasses für PV-Module eine zentralisierte Datenbank voraussetzt, welche die Standardisierung und Einbettung von Datensätzen aus verschiedenen Quellen ermöglicht. Erweiterungen der bestehenden Daten für eine effizientere Entwicklung von zirkulären Geschäftsmodellen, vor allem im Bereich der Wiederverwendung, wurden ebenfalls im Rahmen der Datenbankentwicklung beschrieben. Weitere Anpassungen für ein zukünftig verbessertes Datenmanagement wurden im Deliverable 1.2 adressiert. Das Projekt ermöglicht einen hoffnungsvollen Blick in die Zukunft hinsichtlich der Digitalisierung

¹² Boukhatmi and Groesser, *Investigating the Current State of Circular Economy Software Platforms*.

¹³ Parker, Alstynne, and Choudary, *Platform Revolution*.

der Kreislaufwirtschaft. Wie der vorgestellte Prototyp demonstriert, kann die Entwicklung eines DPPs für PV-Anlagen in der Schweiz problemlos ermöglicht werden, jedoch bestehen noch offene Fragen bezüglich Datenbereitstellung und -hoheit, welche in Folgeprojekten weiter untersucht werden sollen. Dennoch kann wie gezeigt mittels Ergänzungen ein erster DPP etabliert werden, welcher in Zukunft zur Entwicklung weiterer Geschäftsmodelle, zum Beispiel für ein effizienteres Recycling, beitragen wird.

Literatur

- Aarikka-Stenroos, Leena, Paavo Ritala, and Llewellyn D. W. Thomas. "Circular Economy Ecosystems: A Typology, Definitions, and Implications." In *Research Handbook of Sustainability Agency*, 260–76. Edward Elgar Publishing, 2021.
<https://www.elgaronline.com/display/edcoll/9781789906028/9781789906028.00024.xml>.
- Adner, Ron. "Ecosystem as Structure: An Actionable Construct for Strategy." *Journal of Management* 43, no. 1 (January 1, 2017): 39–58. <https://doi.org/10.1177/0149206316678451>.
- Autio, Erkkö. "Orchestrating Ecosystems: A Multi-Layered Framework." *Innovation* 24, no. 1 (January 2, 2022): 96–109. <https://doi.org/10.1080/14479338.2021.1919120>.
- Bonina, Carla, Kari Koskinen, Ben Eaton, and Annabelle Gawer. "Digital Platforms for Development: Foundations and Research Agenda." *Information Systems Journal* 31, no. 6 (2021): 869–902. <https://doi.org/10.1111/isj.12326>.
- Boukhatmi, Ässia, and Stefan Groesser. *Investigating the Current State of Circular Economy Software Platforms*, 2023.
- Boukhatmi, Ässia, Roger Nyffenegger, and Stefan N. Grösser. "Designing a Digital Platform to Foster Data-Enhanced Circular Practices in the European Solar Industry." *Journal of Cleaner Production* 418 (September 15, 2023): 137992. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137992>.
- Bressanelli, Gianmarco, Federico Adrodegari, Marco Perona, and Nicola Saccani. "Exploring How Usage-Focused Business Models Enable Circular Economy through Digital Technologies." *Sustainability* 10, no. 3 (March 2018): 639. <https://doi.org/10.3390/su10030639>.
- Chauhan, Chetna, Vinit Parida, and Amandeep Dhir. "Linking Circular Economy and Digitalisation Technologies: A Systematic Literature Review of Past Achievements and Future Promises." *Technological Forecasting and Social Change* 177 (April 1, 2022): 121508. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121508>.
- Elmasri, Ramez, and Sham Navathe. *Fundamentals of Database Systems*. Seventh edition. Boston Munich: Pearson, 2016.
- Honic, M, I Kovacic, and H Rechberger. "Concept for a BIM-Based Material Passport for Buildings." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 225 (February 24, 2019): 012073. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012073>.
- Kristoffersen, Eivind, Fenna Blomsma, Patrick Mikalef, and Jingyue Li. "The Smart Circular Economy: A Digital-Enabled Circular Strategies Framework for Manufacturing Companies." *Journal of Business Research* 120 (November 1, 2020): 241–61. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.07.044>.
- OpenAPI Initiative. "OpenAPI Specification - Version 3.1.0 | Swagger," 2025.
<https://swagger.io/specification/>.
- Opendata.Swiss. "Electricity Production Plants - Opendata.Swiss," 2024.
<https://opendata.swiss/en/dataset/elektrizitatsproduktionsanlagen>.
- Pagoropoulos, Aris, Daniela C. A. Pigosso, and Tim C. McAloone. "The Emergent Role of Digital Technologies in the Circular Economy: A Review." *Procedia CIRP*, 9th CIRP IPSS Conference: Circular Perspectives on PSS, 64 (January 1, 2017): 19–24.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.047>.

Parker, Geoffrey, Marshall W. Van Alstyne, and Sangeet Paul Choudary. *Platform Revolution: How Networked Markets Are Transforming the Economy and How to Make Them Work for You*. W. W. Norton & Company, 2016.

SENS eRecycling. "Recyclingsystem von Photovoltaik in der Schweiz." SENS eRecycling, 2024.
<https://www.erecycling.ch/wissenswertes/wissensblog/fach-94.html>.

Thomas, Llewellyn, Erko Autio, and David Gann. "Architectural Leverage: Putting Platforms in Context." *Academy of Management Executive* 28 (June 2, 2014): 198–219.
<https://doi.org/10.5465/amp.2011.0105>.

Tiwana, Amrit. *Platform Ecosystems: Aligning Architecture, Governance, and Strategy*. Newnes, 2013.

Walden, Joerg, Angelika Steinbrecher, and Maroye Marinkovic. "Digital Product Passports as Enabler of the Circular Economy." *Chemie Ingenieur Technik* 93, no. 11 (2021): 1717–27.
<https://doi.org/10.1002/cite.202100121>.