

Reconsidering digital deconstruction, reuse and recycle processes using BIM and Blockchain (DiCYCLE)

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 27/2026

Wien, 2026

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination: Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien

Leitung (interimistisch): DIⁱⁿ (FH) Isabella Warisch

Autorinnen und Autoren:

Senior Scientist Mag.rer.soc.oec. Dr.rer.soc.oec Marijana Srećković, Univ. Prof. Dipl.-Ing.

Dr. techn. Iva Kovacic, Dominik Hartmann Bsc., Philipp Krauser Bsc. (Integrale Planung und
Industriebau, 210-01 Institut für Hoch- und Industriebau, Technische Universität Wien)

Dipl.-Ing Martin Kjær, Dipl.-Ing. Thomas Preindl, Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang
Kastner (191-03 Automation Systems Group, Technische Universität Wien)

Dipl.-Ing. T. Romm, Dipl.-Ing. Andreea Crudici, Julia Flaszynska, Pia Bauer (forschen planen
bauen ZT)

Mag. Andrea Kessler, Ing. Peter Kneidinger, Fabian Kessler (materialnomaden)

Peter Heinrich (Altmetalle Kranner GmbH)

Wien, 2026. Stand: März 2025

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Rückmeldungen:

Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an iii3@bmimi.gv.at.

Rechtlicher Hinweis

Dieser Ergebnisbericht wurde von die/der Projektnehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die/der Projektnehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die/der Projektnehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die/der Projektnehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm „Haus der Zukunft“ auf und hat die Intention, Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen, sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMIMI publiziert und elektronisch über die Plattform [nachhaltigwirtschaften.at](https://www.nachhaltigwirtschaften.at) zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	7
2	Abstract	9
3	Ausgangslage	11
3.1.	Motivation.....	11
3.1.1.	Forschungsfrage und Zielsetzung	13
3.2.	Stand des Wissens im nationalen und internationalen Innovationssystem.....	13
3.2.1.	Kreislaufwirtschaft (Circular Economy [CE]).....	14
3.2.2.	BIM für E-o-L.....	17
3.2.3.	BC in AEC.....	18
3.3.	Nationale und internationale Projekte	19
3.4.	Stand des Wissens in der eigenen Forschungseinrichtung und der beteiligten Partner.....	19
3.4.1.	Ergebnisse aus anderen Projekten als Grundlage für DiCYCLE	21
4	Projekthalt	24
4.1.1.	Angewendete Methoden in der Umsetzung	32
5	Ergebnisse	34
5.1.	Dokumentation und Analyse der Prozesse im End-of-Life	34
5.1.1.	Stakeholder-Beziehungen.....	34
5.1.2.	Bewertungen von CE und E-o-L	35
5.1.3.	Gesetze, Normen und Vorschriften.....	36
5.1.4.	Prozesse	37
5.1.5.	Technologien und Daten	38
5.1.6.	Kritikpunkte	39
5.1.7.	Maßnahmen und Empfehlungen für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft	41
5.2.	Use Case Analyse und CE-Hierarchie	43
5.2.1.	CE-Hierarchie und Use Case Einordnung.....	43
5.2.2.	Beschreibung der Use Cases.....	44
5.3.	System Dynamics Modellierung der Use Cases	50
5.3.1.	Beispielhafte SD-Modellierung – Almetalle Kranner (Use Case 2):.....	50
5.3.2.	Beispielhafte SD-Modellierung - Materialnomaden (Use Case 3):.....	53
5.3.3.	Gesamtprozessmodellierung.....	54
5.3.4.	Zentrale Mechanismen, Einflussgrößen und Erkenntnisse aus der SD Modellierung.....	56
5.3.5.	Zusammenfassung der Analyse des Geschäftsprozesses und Systemvariablen	57
5.3.6.	Neue Erkenntnisse und Mehrwert der systemdynamischen Herangehensweise.....	58
5.4.	Digitales Framework und Verknüpfung zur Datenintegration und BIM.....	59
5.5.	Rückschlüsse von E-o-L auf Planungsphase	61
5.5.1.	Massenbilanz Rückbau am Beispiel Ferry Dusika Stadion Wien	61

5.5.2.	Benchmarking und Wertdichte-Analyse nicht-BIM-fähiger Gebäudekomponenten:	64
5.5.3.	Wertstoffe – Vergleich dreier unterschiedlicher Use Cases.....	65
5.6.	Neue Geschäftsmodelle (GM) und Szenarien für E-o-L	67
5.6.1.	Netzwerk.....	67
5.6.2.	Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	70
5.6.3.	DPP Geschäftsmodelle.....	72
5.7.	Framework DiCYCLE.....	73
5.7.1.	Systemarchitektur Blockchain	74
5.7.2.	Proof-of-Concept mit Testfall ReParkett	77
5.8.	Technologische Innovationen und Weiterentwicklungen	79
5.9.	Einpassung in das Programm „Stadt der Zukunft“	83
5.10.	Beitrag des Projekts zu den Gesamtzielen des Programms.....	83
6	Schlussfolgerungen	85
6.1.	Gewonnene Erkenntnisse für das Projektteam	85
6.2.	Wie arbeitet das Projektteam mit den erarbeiteten Ergebnissen weiter?	85
6.3.	Für welche Zielgruppen sind die Projektergebnisse relevant und interessant und wer kann damit wie weiterarbeiten?.....	86
6.4.	Bitte beschreiben Sie ggf. mögliche rechtlichen Hürden, welche in Zusammenhang mit den ausgearbeiteten Konzepten bzw. Technologien bestehen.....	86
6.5.	Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten	87
	Das weitere (Markt-/ Verbreitungs-) Potenzial von DiCYCLE:.....	92
7	Ausblick und Empfehlungen	93
8	Verzeichnisse.....	95
9	Anhang.....	103
9.1.	Data Management Plan (DMP)	103

1 Kurzfassung

Motivation und Forschungsfrage

Die zunehmende Digitalisierung und somit evident voranschreitende Veränderung und notwendige Flexibilisierung in der AEC Industrie verlangt neue Geschäftsmodelle, Vorgehensweisen und Prozesse. Hilfe bieten auf der einen Seite bereits bestehende, aber nicht zu ihrem vollen Potential ausgenutzte Technologien wie BIM; auf der anderen Seite bieten technologische Fortschritte wie Blockchain und Smart Contracts Unterstützung. Gemeinsam ergeben sich neue Möglichkeiten zur Automatisierung von Prozessen in der Wertschöpfungskette und für mehr Transparenz im Gebäude-Lebenszyklus, wodurch die Nachverfolgung und Überprüfbarkeit von Datenänderungen von der Planung bis zum Abbruch, das Reuse- und Recycling-Potential in der Um- und Rückbauphase [End-of-Life (E-o-L)] optimiert und erhöht werden kann.

In DiCYCLE werden folgende Forschungsfragen untersucht: Wie lassen sich E-o-L Prozesse standardisieren und für eine Digitalisierung adaptieren, um ein optimiertes Reuse und Recycling zu ermöglichen?; Welche E-o-L-Datenbestände ändern sich über die Zeit und müssen in BIM kontinuierlich und nachvollziehbar für E-o-L integriert werden?; Wie lassen sich diese Prozesse in neuen digitalen Geschäftsmodellen realisieren und durch Blockchain (BC) und Smart Contracts (SC) nachverfolgbar, überprüfbar und transparent umsetzen?

Ausgangssituation/Status Quo

Die Digitalisierung in der AEC (architecture, engineering, construction)-Industrie schreitet zögerlich voran und bringt große Herausforderungen mit sich, die sich auch in der langsamen Anwendung innovativer Technologien widerspiegeln. Für die Umsetzung digitaler Technologien und Methoden im Gebäude-Lebenszyklus (LZ) ist es notwendig, Abläufe und Arbeitsweisen in der Planung, Bau, Betrieb, sowie Um- und Rückbau (End of Life [E-o-L]) zu erfassen und für die Einbettung digitaler Technologien zu adaptieren. Derzeitig verfügbare Softwaretools entsprechen noch immer nicht den Praktiken und Workflows der End-Nutzer, da Building Information Modeling-gestützte Gebäudemodelle (BIM-Modelle) von vielen verschiedenen Teilhabern in Planung, Bau und Betrieb meist isoliert sowie nur Phasen- und Domänen-spezifisch genutzt werden. Für eine BIM-basierte Um- und Rückbauphase (End-of-Life) sind außerdem standardisierte Prozesse notwendig, die auch eine Implementierung digitaler Tools ermöglichen.

Projekt-Inhalte und Zielsetzungen

Das Ziel von DiCYCLE ist es, End-of-Life-Prozesse im Bauwesen zu analysieren, abzubilden und durch Kopplung digitaler Technologien – BIM, BC und SC - zu optimieren. Daraus entstehen neue Geschäftsmodelle und nachhaltige digitalisierte Bau- und Planungsprozesse, die eine Wiederverwendung (Reuse) und Wiederverwertung (Recycling) von Baumaterialien und Bauelementen entlang des Lebenszyklus ermöglichen sowie Modellverantwortliche und ihre Rollen klar definieren. Mit dem entwickelten integralen DiCYCLE Framework für E-o-L-Prozesse werden relevante Daten mit BIM integriert, über BC überprüfbar und nachverfolgbar gestaltet und schlussendlich für den gesamten Lebenszyklus verkettet, womit eine transparente, recyclinggerechte Erfassung und Nachverfolgung

von Bauelementen und Baumaterialien unterstützt, und Bau- und Abbruchabfälle im Sinne der Kreislaufwirtschaft minimiert werden können.

Methodische Vorgehensweise

Folgende Aspekte sind im Fokus dieses Forschungsvorhabens: einerseits Building Information Modeling-gestützte Gebäudemodelle (BIM-Modelle), die dem tatsächlich ausgeführten Zustand entsprechen („as-built“), und andererseits Prozessflüsse, die sowohl Datenänderungen als auch ausgeführte Bauarbeiten beschreiben. Dabei werden Datenstrukturen für E-o-L-relevante Informationen identifiziert und mit BIM verknüpft. *Die Integration der dafür notwendigen Datenbestände und die Mechanismen zur Überprüfbarkeit über BC-basierende Technologien und SC sollen zur Wiederverwendung und -verwertung der Baumaterialien und Bauelemente eines durchgängigen digitalen Bauwerksmodells entwickelt werden und frühzeitige E-o-L-Assessments ermöglichen.* Zudem wird ein Framework als Proof-of-Concept entwickelt, welches die Umsetzung von BIM, BC und SC in E-o-L ermöglicht. Das Projekt stellt somit die Fortsetzung des in den Forschungsprojekten BIMd.sign und FMChain entwickelten Rahmenwerks für die Implementierung von BC und SC in einer BIM-gestützten Planung (BIMd.sign) und Betrieb (FMChain) dar. Die Innovation des Projekts liegt folglich in der integrativen Sichtweise von E-o-L Daten und Prozessen, deren Kopplung mit BIM und Überprüfbarkeit/Nachverfolgung durch BC und SC. Szenarien für die Umsetzung von BC und SC unterschiedlicher Geschäftsmodelle werden an Testfällen erprobt und evaluiert. Letztlich werden die notwendigen Datenbestände für die BIM und SC-gestützten E-o-L-Prozesse (z. B. Key Performance Indikatoren) exemplarisch mit der Planungsphase integriert (BIM „as-planned“), um eine E-o-L-Prädiktion bereits in den frühesten Planungsphasen zu ermöglichen.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Szenarien für die Umsetzung von BC und SC der unterschiedlichen digitalen Geschäftsmodelle wurden an Testfällen erprobt und evaluiert. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde mit dem Framework DiCYCLE ein dezentrales, vertrauenswürdiges Tool für Prozessmanagement im Baubereich entwickelt. Dieses adressiert zentrale Herausforderungen im Umgang mit sensiblen Prozessdaten und der Sicherstellung von Datenintegrität – insbesondere im Kontext des Reuse und des Recyclings von Baumaterialien, indem es zeigt, wie digitale Technologien als Grundlage für transparente, nachhaltige und ressourcenschonende Prozesse eingesetzt werden können. Neue Geschäftsmodelle und E-o-L-Strategien können abgeleitet werden und als Planungs- und Entscheidungshilfe für Gebäudeeigentümer:innen/Investor:innen dienen und damit generell die „Circular Economy“ im Bauwesen stärken. DiCYCLE schafft somit einen wissenschaftlich fundierten Beitrag für die Digitalisierung der Wertschöpfungsprozesse der Kreislaufwirtschaft in AEC.

Ausblick

Ein zukunftsrelevantes Thema, das sich im Projektverlauf abgezeichnet hat, ist die Einführung digitaler Produktpässe (DPPs) auf europäischer Ebene, die ab 2027 schrittweise verpflichtend werden. Diese Entwicklung eröffnet ein neues Anwendungsfeld für Blockchain-basierte Nachweise, etwa bei der Dokumentation von Materialeigenschaften, Recyclingquoten oder Umweltauswirkungen von Produkten. Insbesondere im Bereich des Bauens und Recyclings könnte das Framework DiCYCLE hier als unterstützende Infrastruktur dienen – entweder ergänzend zu bestehenden Systemen oder für bislang unregelte Prozesse.

2 Abstract

Motivation and research question

The increasing digitalization, ongoing change and necessary flexibilization in the AEC industry require new business models, approaches and processes. On the one hand, existing technologies such as BIM, which are not yet fully exploited, offer help, on the other hand, technological advances such as blockchain and smart contracts offer support. Together, these offer new opportunities for automating processes in the value chain and for greater transparency in the building life cycle, enabling the tracking and verifiability of data changes from planning to demolition, and optimizing and increasing the reuse and recycling potential in the end-of-life (EoL) phase.

The following research questions are being investigated in DiCYCLE: How can EoL processes be standardized and adapted for digitization to enable optimized reuse and recycling? Which EoL databases change over time and need to be integrated into BIM continuously and traceably for EoL? How can these processes be realized in new digital business models and implemented in a traceable, verifiable and transparent manner with BC and SC?

Initial situation/status quo

The digitalization in the AEC industry (architecture, engineering, construction) is progressing slowly, and the major challenges associated with it are also reflected in the slow introduction of innovative technologies. To implement digital technologies and methods in the building life cycle, it is necessary to capture processes and working methods in design, construction, operation, remodeling, and demolition (end of life [EoL]) and adapt them to incorporate digital technologies. Currently available software tools do not yet correspond to the practices and workflows of end users, as Building Information Modeling-based building models (BIM models) are used by many different stakeholders in planning, construction and operation, usually in isolation and only phase- and area-specifically. Furthermore, standardized processes for a BIM-based conversion and end-of-life phase are needed, which also enable the implementation of digital tools.

Project contents and objectives

The aim of DiCYCLE is to analyze, map and optimize end-of-life processes in the construction industry by combining digital technologies – BIM, blockchain (BC) and smart contracts (SC). The aim is to develop new business models and enable sustainable digitized construction and planning processes that allow for the reuse and recycling of building materials and components throughout the entire life cycle, as well as clearly defining the responsibilities and roles of those responsible for the model. With the developed integral DiCYCLE framework for E-o-L processes, relevant data is integrated into BIM, made verifiable and traceable via BC and finally linked for the entire life cycle, thus supporting transparent, recycling-friendly recording and tracking of components and building materials and minimizing construction and demolition waste in line with the circular economy.

Methodical procedure

The research project focuses on the following aspects: on the one hand, on Building Information Modeling-based building models (BIM models) that correspond to the actual as-built state, and on the other hand, on process flows that describe both data changes and construction work that has been carried out. In doing so, data structures for EoL-relevant information are identified and linked to BIM. *The integration of the necessary data sets and the mechanisms for verifiability via BC-based technologies and SC are to be developed for the reuse and recycling of building materials and components of a consistent digital building model and to enable early EoL assessments.* In addition, a framework concept is being developed as a proof of concept that enables the implementation of BIM, BC and SC in EoL. The project thus represents the continuation of the framework developed in the research projects BIMd.sign and FMChain for the implementation of BC and SC in BIM-based planning (BIMd.sign) and operation (FMChain). The innovation of the project thus lies in the integrative perspective of EoL data and processes, their coupling with BIM and the verifiability/traceability through BC and SC.

Scenarios for the implementation of BC and SC of different business models are tested and evaluated using test cases. Finally, the required data sets for the BIM- and SC-supported EoL processes (e.g. key performance indicators) are integrated into the planning phase (BIM “as-planned”) to enable EoL prediction in the earliest planning phases.

Results and conclusions

Scenarios for the implementation of BC and SC of the various digital business models were explored and evaluated using test cases. The DiCYCLE framework was developed as a decentralized, trustworthy tool for process management in the construction industry as part of the research project. This addresses the key challenges of handling sensitive process data and ensuring data integrity – particularly in the context of the reuse and recycling of building materials – by demonstrating how digital technologies can be used as a basis for transparent, sustainable and resource-efficient processes. New business models and EoE strategies can be derived and serve as a planning and decision-making aid for builders/investors, thus strengthening the circular economy in the construction industry in general. DiCYCLE is thus making a scientifically sound contribution to the digitalization of the circular economy's value creation processes in AEC.

Outlook

A forward-looking topic that emerged during the course of the project is the introduction of digital product passports (DPPs) at the European level, which will gradually become mandatory from 2027. This development opens up a new field of application for blockchain-based verification, for example in the documentation of material properties, recycling rates or the environmental impact of products. In particular, in the construction and recycling sectors, the Framework DiCYCLE could serve as a supporting infrastructure here – either in addition to existing systems or for processes not yet regulated.

3 Ausgangslage

3.1. Motivation

Die Bauwirtschaft verbraucht 60% der extrahierten Rohstoffe und verursacht 40% der energiebezogenen CO₂ Emissionen. Abfälle aus dem Bausektor in Österreich machen etwa 70% (44.Mio Tonnen per anno) des gesamten jährlichen Abfallaufkommens aus. Diese Bau- und Konstruktionsabfälle sind einer materiellen Verwertung zuzuführen, sofern dies technisch möglich, ökologisch sinnvoll und nicht mit unverhältnismäßig hohen Kosten verbunden ist (AWG, 2002). Allerdings fehlt ein Rahmenwerk, wie dies zu beurteilen ist. In Abhängigkeit der vorhandenen Massen und Volumina der Abbruchobjekte ist als Abbruchmethode der selektive Rückbau (ÖNORM B 3151) durchzuführen. Diese verwertungsgerechte Trennung und Sammlung von Bau- und Konstruktionsabfällen sowie Beurteilung, welche Bauteile für ein Recycling (Wiederverwertung) oder Reuse (Wiederverwendung) geeignet sind, fällt allerdings in die Verantwortung des Bauherrn oder der Abbruchfirma.

Es besteht daher ein dringender Bedarf, das Reuse- und Recycling-Potential von Baumaterialien und Bauelementen im Gebäude Lebenszyklus (LZ) zu erhöhen und somit den Verbrauch an Primärrohstoffen, den die Architecture Engineering Construction (AEC)-Industrie in großem Ausmaß verursacht, zu reduzieren. Daraus folgend, sind für die Um- und Rückbauphase (End-of-Life [E-o-L])¹ als abschließende Phase im Gebäudelebenszyklus, neue Prozesse und Geschäftsmodelle notwendig, die es ermöglichen 1) eine ressourcenschonende und ökologisch optimierte Wertschöpfungskette von der Planung bis zum Abbruch (sowie nach dem Abbruch - im neuen Zyklus) nachzuverfolgen und umzusetzen, und 2) die dafür relevanten Modelle, Daten und Stakeholder klar zu definieren.

Zusätzlich zu den notwendigen Maßnahmen für die Optimierung der Kreislaufwirtschaft (Circular Economy [CE]), ist eine Digitalisierung in der AEC Industrie, etwa mit BIM (Building Information Modeling), ein großes Bestreben. Im Rahmen dieser Forschung ist der Begriff, wie folgt definiert: BIM wird als gemeinsame digitale Wissensbasis betrachtet, die die Aktivitäten aller Akteure in AEC unterstützt, basierend auf verschiedenen Datensätzen, einschließlich geometrischen und/oder nicht geometrischen Informationen, sodass die Generierung, Austausch und Verarbeitung von Daten innerhalb des LZ von gebauten Strukturen ermöglicht wird (Sibenik und Kovacic, 2020). Zurzeit existieren aber bei der Implementierung von digitalen Technologien wie BIM durch mangelhafte Software-Interoperabilität Herausforderungen beim Datenaustausch und Informationsverluste im Planungs- und Bauprozess. IFC ist das am meisten genutzte Schema für integrale Planung und für den BIM-basierten Datenaustausch mit hunderten Softwaretools, die das Schema unterstützen (vgl. buildingSMART 2021). Der Datenaustausch-Workflow unter Verwendung des IFC-Gebäudedatenmodells ist immer noch sequenziell. In Sibenik und Kovacic (2020) und Shelden et al. (2020) sind die Nachteile von IFC angeführt. Die Interoperabilität, der Fokus auf domänen-spezifische Modelle und Cloud und Web Services sind neue Richtungen, in welche sich die Standards bewegen. Obwohl die BIM-Modelle oftmals als IFC-Dateien definiert sind, sollten auch andere Möglichkeiten wie XML, JSON oder RDFs betrachtet werden, insbesondere weil E-o-L-relevante Parameter (wie. z. B.

¹ „In Architecture, Engineering, and Construction (AEC), the building life cycle comprises four stages (EN 15978:2011): production, construction, use, End-of-Life including deconstruction/demolition, transport, waste processing, and disposal“. (Sreckovic et al., 2024)

Indikatoren) noch nicht Bestandteil von IFC Standard sind. Obwohl die Implementierung von BIM in der Theorie sehr vielversprechend ist, sieht die Umsetzung in der Praxis ganz anders aus. Es gibt immer noch viele prozessuale und technische Probleme. Vordefinierte BIM-Workflows sind in der AEC-Branche für den gesamten LZ gar nicht vorhanden. Kernelemente für die Zusammenarbeit aller Planungsdisziplinen in BIM ist die nahtlose Datenübertragung und bessere Schnittstellen. Das Ziel einer nahtlosen globalen Software-Interoperabilität ist jedoch im AEC-Sektor bei weitem nicht realisiert (Grilo und Jardim-Goncalves, 2010). Ein integrales Schema als Datenverwaltungskonzept in der AEC-Industrie liefert derzeit keine befriedigenden Ergebnisse für viele Disziplinen im Planungsprozess. Bis dies Realität wird, werden sich die Disziplinen, die in dem IFC-Schema nicht berücksichtigt sind, anderen Optionen zuwenden.

Für ein BIM in E-o-L sind standardisierte Prozesse notwendig, die auch eine Implementierung digitaler Tools ermöglichen, aber derzeit noch gar nicht existent sind. Laut der Digitalisierungs-Analyse der Baubranche von Woodhead et al. (2018), sollen in der Zukunft neue Prozesse entstehen, insbesondere in der Fertigungsindustrie. Die Prozesse und die dazugehörigen Regeln sollen parallel entwickelt werden, um das maximale technische Potential ausnutzen zu können (Succar and Poirier 2020). Der konstante Fluss zwischen den „Assets“ (physische und digitale Ressourcen) und zwar den digitalen und/oder physischen mit den Prozessen, die dazwischen passieren, ist zu untersuchen, wobei ein „as-is“ digitales Modell angestrebt werden soll. Um in der E-o-L Phase implementierbar zu sein, sollte das BIM-Modell einen Digital Twin (digitaler Zwilling) so weit wie möglich darstellen und den Letztstand des physischen Gebäudes widerspiegeln - wir verwenden hier, wo angebracht, auch den Begriff „as-is-BIM“, wo alle Änderungen, die nach „as-planned-BIM“ und „as-built-BIM“ erfolgten, inkludiert sind. Das „as-built“ BIM stellt ein digitales Modell der baulichen Realität dar, und das „as-planned-BIM“ ist das resultierende Modell der Planungsphase (Plandata, 2020). Somit ist „as-is-BIM“ jenes Modell, welches alle Gebäude-Änderungen während des LZ umfassen sollte, d.h., jene, die von der Planung bis zum Betrieb und Umbau erfolgt sind. In der Praxis stellen „as-is“ BIM Modelle noch immer ein Problem dar, da BIM-Modelle nach der Planungsphase oft nicht mehr instandgehalten werden. „3D Imaging Technology“ ist ein häufig angewendeter Ansatz für die Neuerstellung von „as-is“ BIM (z. B. O’Keffee and Bosche 2015), es liefert aber statische Modelle, in denen die Änderungen nicht nachverfolgbar sind. Für die End-of-Life Phase ist es aber notwendig, ein BIM-Modell zu haben, welches dem aktuellsten Daten-Stand entspricht, also „as-built“ inklusive aller baulichen Änderungen, die bis zur E-o-L entstanden sind. Diesen Ansatz verfolgen die zwei laufenden Forschungsprojekte, BIMd.sign (TU-IBAU) und FMchain (TU-ASG), die eine zentrale BIM Datenhaltung entwickeln. Mit zentraler Datenhaltung ist eine offene Datenbasis gemeint, in der die Gebäudemodelle und deren Änderungen enthalten sind und dynamisch auf dem aktuellen Stand gehalten werden, somit „as-is“. Für das Projekt DiCYCLE ist geplant, „as-built“ Modelle zu verwenden, jedoch besteht auch die Möglichkeit entwickelte „as-is“ Modelle zu nutzen, die nach dem Abschluss der beiden Projekte generiert wurden.

Für die Umsetzung digitaler Technologien und Methoden im Gebäude-Lebenszyklus und CE ist es notwendig, Abläufe und Arbeitsweisen für E-o-L zu erfassen und für die Einbettung digitaler Technologien zu adaptieren. Das in diesem Forschungsvorhaben untersuchte Geschäftsmodell soll die BC-Technologie für die E-o-L Phase nutzen. Die BC-Technologie erfordert ein Überdenken der bestehenden Arbeitsabläufe und kann dazu beitragen die Potentiale eines BIM-Workflows zu nutzen. BC-gestützte Workflows können die Transparenz erhöhen, die Prozesse beschleunigen und die Kommunikation vereinfachen, indem sie in Echtzeit Einblick in Datenänderungen geben und die Abfragemöglichkeiten für jeden Prozessschritt oder Phase erleichtern. BC und SC können den Fortlauf in den Prozessen und die Änderungen in den BIM Modellen dokumentieren. Dabei werden die Zuständigkeiten und Eingriffsrechte der einzelnen Teilnehmer von SCs verwaltet und die Einhaltung

der Prozessschritte sichergestellt. Des Weiteren wird das zum jeweiligen Zeitpunkt aktuelle BIM-Modell per digitalem Fingerabdruck in der BC verankert. Die Speicherung erfolgt „Off-Chain“ in einem dezentralen Datenspeicher (IPFS) – diese Umsetzung wird in BIMd.sign und FMChain erforscht und soll auch auf DiCYCLE ausgeweitet werden. In einem BIM und BC & SC-gestützten Geschäftsmodell für E-o-L sind somit mehrere Vorteile gegenüber den bestehenden Workflows zu erwarten. Neben einem nahtlosen Daten- und Informationsaustausch und automatisierten Kommunikationsschritten wird das neue Modell allen Anwendern die aktuellste Daten-Version zur Verfügung stellen, Änderungen während der Gebäude-LZ nachverfolgen und einen schnelleren und überprüfbareren Datenfluss ermöglichen. Somit wird eine optimierte E-o-L Wertschöpfungskette geschaffen, die aktualisierte Möglichkeiten für Recycling und Reuse in der E-o-L Phase aufzeigt.

3.1.1. Forschungsfrage und Zielsetzung

Hieraus ergeben sich folgende Problemstellungen, die einen unmittelbaren Bedarf für DiCYCLE unterstreichen:

- Wie lassen sich E-o-L Prozesse standardisieren und für eine Digitalisierung adaptieren, um ein optimiertes Reuse und Recycling zu ermöglichen?
- Welche E-o-L-Datenbestände ändern sich über die Zeit und müssen in BIM kontinuierlich und nachvollziehbar für E-o-L integriert werden?
- Wie lassen sich diese Prozesse in neuen digitalen Geschäftsmodellen realisieren und durch BC und SC nachverfolgbar, überprüfbar und transparent umsetzen?

Die Forschungslücke, die somit mit DiCYCLE angesprochen wird, liegt in der integrativen Sichtweise von E-o-L Daten und Prozessen sowie deren Kopplung an existierende BIM Datenbestände und überprüfbare Ablaufprozesse mit BC und SC.

Zielsetzung des Projekts ist die Entwicklung eines Frameworks und ein Proof-of-Concept für die Nutzung von BIM und BC in der E-o-L-Phase, durch die Definition von neuen E-o-L Geschäftsmodellen, der Anknüpfung mit BIM, und darauf aufbauend dem Entwurf von SC mit BC. Damit sollen neue digitale Geschäftsmodelle entstehen und nachhaltige digitalisierte Bau- und Planungsprozesse gestattet werden, die eine Wiederverwendung und Wiederverwertung von Baumaterialien und Bauelementen am Ende des Lebenszyklus ermöglichen sowie Modellverantwortliche und ihre Rollen klar definieren. Hieraus ergeben sich folgende Subziele (siehe auch Kapitel 4):

Subziel 1: Dokumentation der Wertschöpfungskette in E-o-L

Subziel 2: Neue Geschäftsmodelle (GM) und Szenarien für E-o-L

Subziel 3: Definition eines integralen Frameworks für E-o-L Prozesse

3.2. Stand des Wissens im nationalen und internationalen Innovationssystem

Die AEC-Industrie zählt zu den Industrien mit dem größten Einfluss auf unsere Gesellschaft und Umwelt und einem weltweit signifikanten Anteil am Bruttoinlandsprodukt; jedoch trägt sie auch zu einem bedeutenden Ausmaß an der Verschwendung von Ressourcen und Energie bei, aufgrund von Fehlentscheidungen, Kosten und Zeitüberschreitungen bei der Planung und Bauausführung. Ein nachhaltiges Umgehen mit diesen Ressourcen im Sinne der Kreislaufwirtschaft, wie das

Wiederverwerten und Wiederverwenden von Bauelementen und Baumaterialien, sowie Baurestmassen (BRM), oder sogar ein Planen für den Rückbau (Design for Deconstruction - DfD) sind imperativ für die Reduzierung von Abfall- und Umweltauswirkungen. Dies impliziert auch, dass der Bedarf an Rohstoffen in Neu- und Umbauprojekten optimiert werden kann. Während DfD ökologische, soziale und wirtschaftliche Vorteile hat, ist heute kaum ein entworfenes und gebautes Gebäude auf den Rückbau ausgelegt.

Daraus folgend, sind für die Um- und Rückbauphase, als abschließende Phase im Gebäudelebenszyklus nach Planen/Bauen/Betrieb, Prozesse und Geschäftsmodelle notwendig, die es ermöglichen, eine nachhaltige ressourcenschonende Wertschöpfungskette von der Planung bis zum Abbruch umzusetzen. Die zunehmende Digitalisierung in AEC, insbesondere die Implementierung von BIM, verlangen demnach eine entsprechende Strukturierung von E-o-L relevanten Daten und eine Standardisierung von Prozessen, die durch Kopplung an neue Technologien wie Blockchain (BC) und Smart Contracts (SC) überprüfbar und transparent gestaltet werden können.

3.2.1. Kreislaufwirtschaft (Circular Economy [CE])

Das Bauwesen ist für einen erheblichen Anteil an Rohstoffabbau, Abfallproduktion, sowie CO₂-Ausstoß und Energiekonsum verantwortlich. 40-60% des weltweiten Rohstoffbedarfs sind auf Bautätigkeiten zurückzuführen (Bribián et al., 2011, Saghabi & Teshnizi, 2011), welcher sich im Zeitraum von 1970-2017 verdreifacht hat (Global Resource Outlook, 2019). Der Anteil an Bau- und Konstruktionsabfällen beläuft sich auf 17% in Österreich (BAWP 2017) - mit Berücksichtigung von Bodenaushub sogar auf über 70% des Gesamtabfallaufkommens - und EU weit auf etwa 33% (Management of CDW= „Construction Demolition Waste“ in the EU, 2011). Die CO₂-Emissionen durch Bauen und Betreiben von Bauwerken betragen rund 40-50% des weltweiten CO₂-Ausstoßes (WGBC 2016) und sind für ca. 40% des Energiekonsums verantwortlich (EU Green Deal, 2019), wobei 5-10% für die Baumaterialproduktion (Herczeg et al. 2014) herangezogen werden. Vor allem im städtischen Raum ist die Baumaterialbilanz Masse-mäßig relativ ausgeglichen (Brunner 2011). Obwohl Baumaterial ein endliches, knappes Gut darstellt, findet Materialeffizienz in der Planung selten solch einen Fokus wie Energieeffizienz, obwohl von Seiten der EU, Schutz des Naturkapitals gefordert wird (EU Green Deal, 2019). Betrachtet man die beiden Begriffe Nachhaltigkeit und CE-Nachhaltigkeit: „Eine Entwicklung, welche die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne die Chancen künftiger Generationen zu gefährden“ (Brundtland, 1987); CE: „Ein regeneratives System, in dem Ressourceninput und Abfall, Emissionen und Energieverluste durch Verlangsamung, Schließung und Verengung von Material- und Energiekreisläufen minimiert werden“ (Geissdoerfer et al., 2017) - so fällt auf, dass bei der Umsetzung von CE-Maßnahmen auch die daraus resultierenden Umweltauswirkungen berücksichtigt werden müssen. Die verstärkte Umsetzung von CE hat jedoch nicht nur ökologische Auswirkungen, wie beispielsweise Ressourcenschonung, Reduktion von Transportwegen, des Energiebedarfs bei der Materialherstellung und Aufbereitung, sowie der dabei entstehenden Emissionen (EU RessEff 2014), sondern auch ökonomische Vorteile. Wirtschaftliche Potentiale liegen hierbei in der Schaffung neuer Wirtschaftsbereiche und Berufsfelder, was eine erhöhte Beschäftigung mit sich zieht, und durch direkte und indirekte Auswirkungen aus volkswirtschaftlicher Sicht sehr zu begrüßen ist (EU RessEff 2014, Meyer et al., 2016).

Bau- und Konstruktionsabfälle sind gemäß (AWG, 2002) – Nationale Umsetzung der EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98 - einer materiellen Verwertung zuzuführen, sofern dies technisch möglich, ökologisch sinnvoll und nicht mit unverhältnismäßig hohen Kosten verbunden ist. Allerdings fehlt ein Rahmenwerk, wie dies zu beurteilen ist. In Abhängigkeit der vorhandenen Massen und

Volumina der Abbruchobjekte ist als Abbruchmethode der selektive Rückbau gemäß ÖNORM B 3151 durchzuführen und ebenso eine Schad- und Störstofferkundung gemäß ÖNORM B 3151, oder (bei 3500m³ verbautem Volumen) ÖNORM EN ISO 16000-32. Auf Grundlage der Erkundung wird ein Rückbaukonzept erstellt, welches jedoch im Rückbauprozess nicht fortgeschrieben wird und keinen bindenden Charakter besitzt. Die verwertungsgerechte Trennung und Sammlung von Bau- und Konstruktionsabfällen (nach Einhaltung der geltenden Gesetze wie Recycling-Baustoffverordnung, ÖNORM B3151), sowie die Beurteilung, welche Bauteile wiederverwendet werden, obliegt somit der Abbruchfirma und dem Bauherrn. Derzeit bestehen auch Vermittlungsbörsen für Recyclinbaustoffe, wie die „Recycling-Börse Bau“², „Harvest Map“^{3,4} und „kringloopnet“⁵. Für einige Baumaterialien besteht jedoch derzeit aufgrund geltender Gesetze nicht die Möglichkeiten der materiellen Verwertung. Durch Änderungen in der Produktion könnte dies allerdings in Zukunft möglich sein.

Abbildung 1 zeigt die verschiedenen Möglichkeiten der Prinzipien der Kreislaufwirtschaft vor Ort. Die Begriffe Recycling, Verwertung und Wiederverwendung sind eng miteinander verbunden. Im Folgenden werden die genannten relevanten Begriffe näher erläutert:

- ✓ **Abbruch** bezieht sich auf den Akt des Zerstörens oder Entfernens von Gebäuden oder Strukturen, um Platz für Neubauten zu schaffen. In der Baustoffrecycling-Verordnung steht die folgende Definition: *„Abbruch“ jede Abbruchtätigkeit, bei der Bau- oder Abbruchabfälle anfallen, dazu zählen auch Teilabbruch, Umbau, Renovierung, Sanierung, Reparatur, Abbauarbeiten, Instandhaltungsarbeiten und Instandsetzungsarbeiten.*⁶
- ✓ **Rückbau** hingegen wird in ÖNORM B3151 wie folgt beschrieben: *Rückbau - Abbruch eines Bauwerks im Allgemeinen in umgekehrter Reihenfolge der Errichtung eines Bauwerks, mit dem Ziel, dass die beim Abbruch anfallenden Materialien weitgehend einer Wiederverwendung, Vorbereitung zur Wiederverwendung von Bauteilen oder einem Recycling zugeführt werden können unter Trennung der anfallenden Materialien und unter Berücksichtigung der Schadstoffgehalte, sodass eine Vermischung und Verunreinigung der anfallenden Materialien minimiert und ein Entweichen von Schadstoffen verhindert wird.*⁷ Seit der Einführung von ÖNORM B3151 im Jahr 2014 soll der Begriff 'Rückbau' in Österreich den Begriff 'Abbruch' und die damit verbundenen Praktiken ersetzen.
- ✓ **Entfrachtung** bezeichnet die *Entfernung der Schad- und Störstoffe zur Herstellung des Freigabezustandes*⁸. Dies beschreibt den Prozess der Trennung von wiederverwendbaren Materialien und Bauteilen während des vorbereitenden Rückbaus, um sie von anderen Abfallstoffen zu trennen.
- ✓ Die **Demontage** ist der Prozess, der dem Abriss vorausgeht und die sorgfältige Entfernung von Materialien und Einbauten wie Teppichen, Beleuchtungskörpern, Wandpaneelen und Türen aus der Gebäudestruktur umfasst, wobei deren Unversehrtheit erhalten bleiben soll (Zhang et al., 2022).

² http://www.recycling.or.at/rbb/cake_rbb/

³ <https://urbanmining.at/harvestmap-im-stadtlabor/6240>

⁴ <https://www.oogstkaart.nl/>

⁵ <https://www.kringloopnet.nl/>

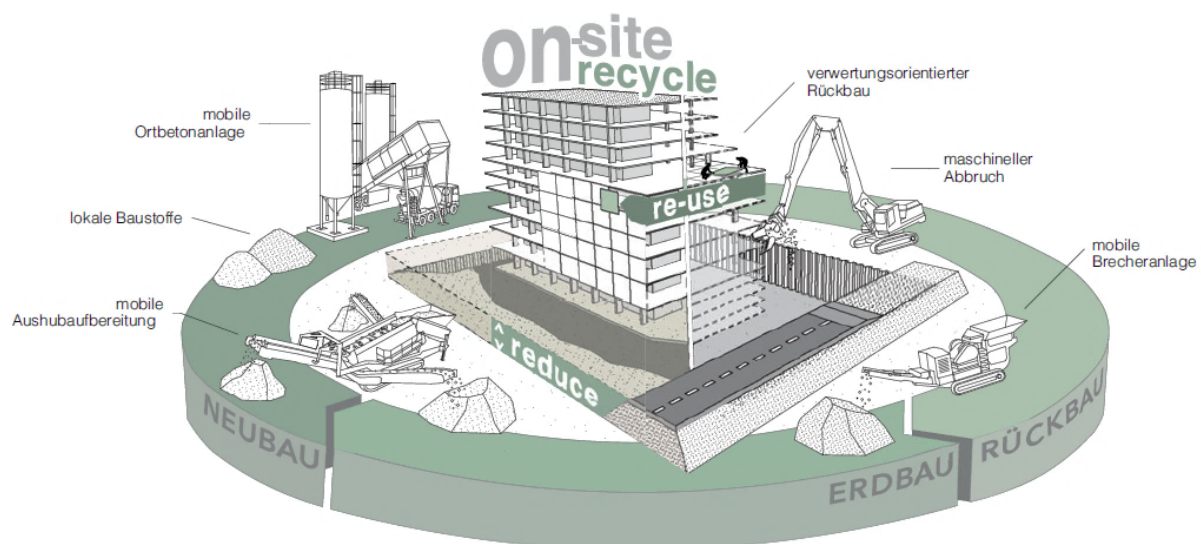
⁶ Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2016, www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20009212 (abgerufen am 27.12.2023; 10:10)

⁷ ÖNORM B 3151, 2022

⁸ ÖNORM B 3151, 2022

- ✓ Zusätzlich zu den Hauptbegriffen spielt das Konzept des **Urban Mining** eine entscheidende Rolle. „Urban Mining“ kennzeichnet das Verständnis, dass Rohstoffe, Altstoffe und Abfallprodukte, die in Gebäuden im Sinne einer „Mine“ gelagert sind, am Ende ihrer Nutzungsdauer – etwa beim Abbruch eines Gebäudes – wiederverwendet oder recycelt werden, anstatt sie zu entsorgen oder zu deponieren. Dazu zählen etwa Fenster, Holz, Fliesen, Türen, Möbel, Metalle und vieles mehr. Diese können direkt im am Abbruchort nachfolgenden Neubau oder an einem anderen Ort wieder zum Einsatz gebracht werden (Schanda, 2021). Eine Variante des Urban Minings ist das sogenannte **„Social Urban Mining“**, bei den sozialen und partizipativen Ansätzen zur Ressourcengewinnung aus bestehenden Gebäuden und Infrastrukturen angewendet werden. BauKarussell e.Gen⁹ zeichnet sich in diesem Wirtschaftsmodell aus.
- ✓ **Recycling** bezeichnet den Prozess der Wiederaufbereitung von Abfällen, um daraus neue Materialien oder Produkte herzustellen. *„Recycling-Baustoff“ eine aus Abfällen hergestellte natürliche, industriell hergestellte oder recycelte Gesteinskörnung, die gemäß der EU-Bauprodukte-Verordnung als Baustoff verwendet werden kann.*¹⁰ **Verwertung** hingegen bezieht sich auf die Nutzung von Abfallstoffen als Ressourcen, sei es durch Energiegewinnung oder stoffliche Verwertung. **Wiederverwendung** bedeutet die erneute Nutzung von Bauteilen oder Materialien in ihrer ursprünglichen Form, ohne dass eine Veränderung oder Aufbereitung erforderlich ist.

Abbildung 1: Kreislaufwirtschaft auf der Baustelle: Abfallvermeidung durch aushubarmes Bauen, Wiederverwendung von Bauteilen und Verwertung von auf der Baustelle gewonnenen Baustoffen
© 2018 Romm ZT



⁹ www.baukarussell.at (abgerufen am 01.12.2023; 09:17)

¹⁰ Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2016, www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20009212 (abgerufen am 27.12.2023; 11:23)

❖ INDIKATOREN UND DATEN

Es gibt viele Bewertungsmethoden, die nachhaltige Aspekte von Gebäuden berücksichtigen, mit einem breiten Spektrum an Parametern. Die Bewertung der End-of-Life-Performance und der Demontagefreundlichkeit (Vogdt et al., 2019, Sanchez et al., 2019, IBO(a), 2018), Life-Cycle-Assessment (LCA) mit verschiedenen Ansätzen (IBO(b), 2018, Malmqvist et al., 2011) und Materialdokumentation in Form von materiellen Gebäudepässen (MGP) (Markova & Rechberger, 2011, Honic et al. 2019, Heinrich & Lang, 2019). Es gibt auch Gebäudezertifizierungssysteme, die darauf abzielen, diese Aspekte zu berücksichtigen, wie beispielsweise DGNB, TQB, SBTool, BREEAM, LEED, ÖGNI, BNB. Hierbei fällt die Berücksichtigung der Materialeffizienz jedoch ganz unterschiedlich aus. **Neben geometrischen Kenngrößen, materieller Zusammensetzung sowie Dichte der Materialien sind für die meisten Evaluierungsansätze Informationen bezüglich Entsorgungsweg, Recyclingmethode und Ergiebigkeit dieser, Lebensdauer, Aufwand für Rückbau- und Recyclingprozesse sowie deren Material-Trennbarkeit notwendig.**

Die dafür erforderliche Datengrundlage muss zugänglich und interoperabel sein (EU Green Deal, 2019). Weiters besteht die Forderung eine Beurteilung der Materialeffizienz von Gebäuden so zu gestalten, dass diese in bereits bestehende Gebäudezertifizierungssysteme eingebettet werden kann, oder separat - als alleinstehende Beurteilung - durchführbar ist. Derzeit bereits zur Verfügung stehende Daten sind unter anderem von IBO (baubook), IBU, Integrated Material Profile and Costing (von The Building Research Establishment) oder in Form von Environmental Product Declarations (EPDs) vorhanden.

3.2.2. BIM für E-o-L

Die Implementierung neuer Technologien und Werkzeuge verlangt die verstärkte Integration von Prozessen und Beteiligten im Lebenszyklus eines Gebäudes – von der Planung bis zur E-o-L Phase. Business-Prozesse in der AEC-Industrie folgen etablierten traditionellen Arbeitsweisen, die immer noch nicht, oder nur teilweise, für die Digitalisierung geeignet sind. Zurzeit existieren Herausforderungen bei der Implementierung von BIM und digitalen Technologien wie mangelhafte Software-Interoperabilität, Datenaustauschprobleme oder Informationsverluste. Hauptgründe dafür sind fehlende Prozessbeschreibungen, die durch zahlreiche unterschiedliche traditionelle Arbeitsweisen charakterisiert sind, und als Folge ungenügend nützliche und nutzbare Implementierung ermöglichen. Während die BIM-Workflows aus den davor genannten Gründen problematisch sind, sind die E-o-L Prozesse nicht einmal analog definiert bzw. standardisiert und dadurch für digitale Prozesse nicht adaptiert. Beispielsweise wäre durch eine automatisierte digitale Anknüpfung von Ökobilanzierungen (Life Cycle Assessments) mit BIM eine Identifizierung von ökologisch und ökonomisch relevanten Parametern für eine ressourcenoptimierte Gebäudeplanung und somit auch E-o-L Phase möglich. Jedoch scheitert dies derzeit noch auf der technischen und prozessualen Ebene (Potrč et al., 2020). Akbarieh et al (2020) führen eine umfangreiche bibliometrische Untersuchung über BIM in E-o-L durch. Sie argumentieren, dass das BIM-basierte E-o-L unter dem Fehlen eines globalen Rahmenwerks leidet. Sie zeigen Probleme auf, die auch mit den proprietären Softwarelösungen zusammenhängen, und somit einen starken Einfluss auf den Grad der E-o-L Digitalisierung haben.

Die erforderliche Flexibilität zwischen den Disziplinen in AEC wird im aktuell meistverwendeten Open-Exchange-Schema Industry Foundation Classes (IFC) nicht unterstützt. Das Taxonomiemodell, mit welchem Austauschforderungen definiert werden, hat eine sehr gute und umfangreiche Menge an Begriffen, die Bauelemente und deren Attribute umfassen. Dieses Schema deckt jedoch nicht alle

notwendigen Anforderungen aller Teilhaber in AEC ab, insbesondere der LZ Experten - ökologische Parameter sind dabei nicht oder nur in geringem Ausmaß berücksichtigt (Santos et al. 2019). Akbarieh et al. (2020) kommen somit auch zum Schluss, dass die E-o-L Phase in keiner BIM Software ausreichend berücksichtigt wird. Die vorhandenen Lösungen basieren auf lokalen Abfallbewirtschaftungsrichtlinien und der Auswahl fallspezifischer Nachhaltigkeitskriterien. Diese Trennung zwischen BIM-Tools und E-o-L-Tools behindert Berichten zufolge ganzheitliche E-o-L-Betrachtungen. Die fehlenden Richtlinien für Material- und Komponentendatenbasen verhindern Rückschlüsse von E-o-L-Betrachtungen, die bereits in der Planungsphase relevant sind. Ein integrales Schema sollte vollständig sein und alle Produkt- und Projektdaten aus allen beteiligten Disziplinen unterstützen. Bei der Implementierung von Softwarelösungen muss der Fokus auf Filter- und Interpretationsprozesse gelegt werden. Softwarelösungen sollten klar definierte Subschemas des integralen Modells unterstützen, wie das Konzept von Model View Definition (MVD) in der IFC-Welt, und eine Lösung für die Bedürfnisse der Endbenutzer bieten. Disziplin-spezifische Subschemas, die Austauschforderungen darstellen, und klar definierte Beziehungen mit anderen Disziplinen sind der Schlüssel zum Erreichen eines fehlerfreien Datenaustausches.

3.2.3. BC in AEC

Die BC Technologie, oft auch als Distributed Ledger Technology (DLT) bezeichnet, wurde durch Bitcoin (Nakamoto, 2008) begründet und hat seither weite Verbreitung gefunden. Während der Begriff ursprünglich nur die verkettete Datenstruktur von Bitcoin beschrieb, wird er mittlerweile für die Hintergrundtechnologie verwendet. Im technischen Sinne ermöglicht DLT die dezentrale Synchronisation von Zuständen. Das können Kontostände wie im Fall von Bitcoin sein, aber auch andere Daten, für die es wichtig ist, dass alle TeilnehmerInnen den aktuellen Stand kennen. Die DLT kann zusätzlich dazu verwendet werden, Zustandsänderungen zu kontrollieren, wo dies durch den Einsatz von SC (Szabo, 1997) sichergestellt wird. Die Ethereum BC (Buterin et al., 2013) wurde eigens dafür entwickelt, um SC auszuführen und hat sich mittlerweile zum de facto Standard entwickelt.

BC sind in ihrer ursprünglichen Form (Bitcoin, Ethereum) offene Netzwerke, an denen jeder teilnehmen kann, wo jedoch auch alle Daten öffentlich einsehbar sind. Private BCs, bei welchen zumeist alle TeilnehmerInnen bekannt sind (permissioned) und nur diese auf die abgelegten Daten zugreifen können, eignen sich daher besser für den Einsatz in Unternehmen (Wüst et al., 2017). Leider waren viele dieser Einsätze nicht erfolgreich, was am Fehlen des „Netzwerkeffekts“ bei privaten BCs liegen könnte. Eine hybride Lösung aus SC in öffentlichen Netzwerken und privaten Datenbanken, die über standardisierte Schnittstellen Daten austauschen, kann dieses Problem beheben. Das Baseline Protokoll (Baseline Protocol Initiative, 2021) kann einen solchen Standard bieten. Baseline zielt darauf ab, Geschäftsprozesse per BC abzuwickeln, für welche eine traditionelle zentralisierte Verbindung der IT-Systeme nicht wirtschaftlich ist.

DLT bieten die erforderlichen Eigenschaften, um BIM-Workflows zu digitalisieren und dadurch zu erleichtern, weil die dezentrale Architektur besser den Interaktionen der Teilnehmer eines Workflows entspricht und dadurch einfacher zur Anwendung kommen kann (Nawari et. al., 2019). Eine Einbindung von automatischen Zahlungsflüssen stellt einen weiteren potentiellen Anwendungsfall dar (Ye, et al., 2018), wobei zum Beispiel dezentrale Organisationen zum Einsatz kommen können, um die Abläufe zu orchestrieren. In der Literatur gibt es einige konzeptionelle Studien, welche beispielsweise aufzeigen wie BIM-Modelle über eine BC-basierende Datenplattform ausgetauscht werden können (Suliyanti et al., 2020), wie Sustainability-Eigenschaften mit BIM-Modellen verknüpft und durchgängig per BC überwacht werden können (Liu et al. 2019) oder wie BIM Modelle mit Gebäudemanagementsystemen

und dem Internet of Things (IoT) per BC vernetzt werden könnten (Lokshina et al., 2019). Sämtliche Konzepte gehen aber nicht über das Ideen-Stadium hinaus oder vernachlässigen wichtige Aspekte wie Überprüfbarkeit der Daten, Privatsphäre, Sicherheit, Offenheit und Kompatibilität.

3.3. Nationale und internationale Projekte

M-DAB: Zielt darauf ab, Bauwerke nach Errichtungsphase zu kategorisieren, und in Abhängigkeit des Volumens, den Bau- und Konstruktionsabfall, sowie die Entsorgungskosten der Zukunft abschätzen zu können und als Wissensbasis für nutzbare Ressourcen für eine nachhaltige Materialbewirtschaftung zu dienen. Hierbei liegt der Fokus auf der Stadt Wien.

Madaster: Ist ein Schweizer Gebäude-Rohstoffkataster. Die Materialpässe der eingetragenen Objekte dienen als Grundlage für Urban Mining Prozesse, zeigen zirkuläres und finanzielles Potential, sowie die Möglichkeit der Bauteil-Wiederverwendung auf.

Growing in Circles: Von den vereinten Nationen ins Leben gerufene Programm "Global Initiative for Resource-Efficient Cities" (GI-REC) versucht, integrierte Ansätze und Analysen wie den urbanen Metabolismus in der Stadtplanung und -verwaltung anzuwenden und hat zum Ziel Vertreter der Industrie, Politik und Forschung anzusprechen. "Growing in Circles" fasst die GI-REC-Erfahrungen zusammen.

GrowingCircle: Nutzung von BIM - um neben klassischen Aspekten wie Statik, Akustik oder Thermik, Bauprozesse mit neuen Bereichen/Analysen wie Lebenszykluskosten, Abfall, Umwelt, etc. in einem vereinfachten Ansatz abbilden zu können. Hierfür sind mehr Materialdaten erforderlich.

BIMERR: Der Fokus liegt hier auf Umbautätigkeit infolge thermischer Sanierung. Das Renovation-4.0-Toolkit soll Akteure der AEC im Zuge der Sanierung bestehender Gebäude unterstützen. Die Anbindung an Lösungen von Drittanbietern soll eine nahtlose BIM-Lösung aller Beteiligten und reibungslosen Informationsaustausch ermöglichen.

BIM4Ren: Das Potential des Einsatzes von BIM für die thermische Sanierung von Bestandsgebäuden entlang der gesamten Wertschöpfungskette wird untersucht. Methoden, Prozesse und harte Technologien werden zur Datenerfassung und -management genutzt und in eine One-Stop-Access-Plattform eingebettet.

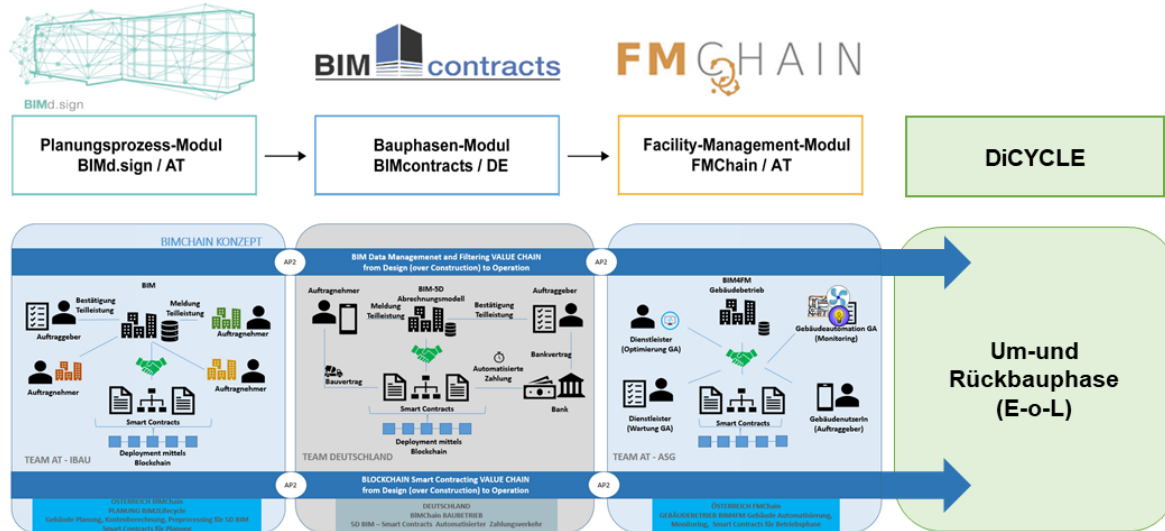
3.4. Stand des Wissens in der eigenen Forschungseinrichtung und der beteiligten Partner

Die zwei Projektpartner der TU Wien (**TU-IBAU** und **TU-ASG**) haben jahrelange Erfahrung in der Zusammenarbeit insbesondere im Forschungsfeld der Modellierung und Optimierung von Ressourceneffizienz von Prozessen und Gebäuden mit holistischem Ansatz. Im Rahmen der Forschungsprojekte **BIMd.sign** (FFG-Nr. 87384; TU-IBAU) und **FMChain** (FFG-Nr. 873827; TU-ASG) erarbeiteten sie bereits die Grundlagen für die Verknüpfung von Prozessen in der Planungsphase (BIMd.sign) sowie Betriebsphase (FMChain) mit BIM-Modellen und Blockchain/Smart Contracts. Außerdem waren sie im Rahmen von IKT der Zukunft - Smarte Datenwirtschaft AT/DE 2018 verbunden, in welcher die Phasen Planen[AT]-Bauen[DE]-Betrieb[AT] im Rahmen eines gemeinsamen länderübergreifenden Frameworks¹¹ mit BIM, BC und SC verknüpft werden sollten. Mit dem DiCYCLE-

¹¹ <https://bimcontracts.com/transnationale-kooperation> (abgerufen am 10.04.2025; 13:43)

Framework kann dieses BIM-BC&SC Rahmenwerk erweitert werden und so den gesamten Gebäude-Lebenszyklus umfassen (s. Abb. 2).

Abbildung 2: Framework für Planen/Bauen/Betrieb erweitert um E-o-L © 2022 TU Wien



Der Forschungsbereich **Integrale Bauplanung und Industriebau (TU-IBAU)** forscht und entwickelt seit Jahren intensiv im Bereich der Methoden für integrale, inter-/multidisziplinäre Planung gestützt durch BIM und digitale Planungswerkzeuge (Simulation, Prädiktion) und verfügt daher über einschlägige Kompetenz und Erfahrung. Im Rahmen der forschungsgeleiteten Lehre werden die Erkenntnisse und (Zwischen)Ergebnisse im eigens etablierten Integrated Design LAB umgesetzt und getestet. Die Forschungsschwerpunkte im Bereich von BIM liegen auf der Modellierung und dem Datentransfer im interdisziplinären Kontext (an der Schnittstelle zwischen Architektur und Bauwesen): der Schaffung von Transferregeln für den reibungslosen Datenaustausch (Doctoral College Computational Design, beim Spezialforschungsbereich „Advanced Computational Design“), der Definition der Workflows für die Geometrieübertragung (DATAFILTER) sowie der automatisierten Erstellung von Materiellen Gebäudepässen und Ökobilanzen (BIMaterial und SCI_BIM).

Der Forschungsbereich **Automation Systems (TU-ASG)** besitzt langjährige Erfahrung in der Steuerungs- und Automatisierungstechnik speziell im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung. Die Expertise erstreckt sich von klassischen Systemen der Automation wie KNX, BACnet, LonWorks und diversen funkbasierten Technologien über die Entwicklung von Embedded Systems und Middleware bis zur Integration der Systeme in Fog- und Cloud-basierende Lösungen. Hauptaugenmerk wird hier allen voran auf die Informationsmodellierung gelegt, um die heterogen vorliegenden Datenbestände zusammenzuführen (Wissensrepräsentation und Ontologien) und innovative Ansätze zur Maschinen-Maschinen Kommunikation untersucht, wie die dahinterliegenden Systeme in das Internet of Things (IoT) nahtlos integriert werden können. Im Rahmen der Forschungsarbeiten werden Proof-of-Concept zur Validierung der Anforderungen erstellt. Im Rahmen von FMChain arbeitet der Forschungsbereich an einer Blockchain-Transaktionskette, um die Gültigkeit und Nachvollziehbarkeit komplexer Vertragskonstellationen im Zusammenspiel mit digitalen Bauwerksmodellen in der Betriebsphase sicherzustellen.

Das Architekturbüro **forschen planen bauen (FPB)** ist Gründer von **BauKarussell** einem Kooperationsnetzwerk für social urban mining. BauKarussell ist einer der ersten österreichischen Anbieter für den verwertungsorientierten Rückbau mit besonderem Fokus auf Wiederverwendung

(Reuse) für großvolumige Objekte. BauKarussell hat es sich zum Ziel gesetzt, die Kreislaufwirtschaft in der Bauwirtschaft zu fördern, und zwar durch die professionelle Begleitung von Bauherren bei der Rückbauplanung und -durchführung. In Zusammenarbeit mit großen Wiener Bauträgern werden im Bereich des Abbruch-vorbereitenden Rückbaus Re-Use-fähige Bauteile und Komponenten ausgebaut und für die Wiederverwendung im Neu- oder Umbau zur Verfügung gestellt. Parallel dazu werden recyclingfähige Baustoffe manuell getrennt und der stofflichen Verwertung zugeführt.

Altmetalle Kranner (AMK) sind Experten im Bereich Metallrecycling und Abfallwirtschaft. Das Unternehmen betrieb von 2011 bis 2020 den Blog *urbanming.at* und hat in der Zeit mitgeholfen dieses Thema über Expertenkreise hinaus bekannt zu machen. Die Kranner GmbH betreibt 3 Standorte im Raum Wien wo vorwiegend Altmetalle und Kabelschrott sowie Eisenschrotte und Elektronikschrotte angekauft werden. Dort werden diese Stoffströme in sortenreine Qualitäten gebracht und letztendlich der verarbeitenden Industrie als Sekundärrohstoff zur Verfügung gestellt. Es wird die Sortierung, die Zerlegung und die Behandlung von Abfällen betrieben. Über die Mitgliedschaft beim VDM (Verband Deutscher Metallhändler e.V.) und der jahrelangen Marktpräsenz verfügt die Kranner GmbH über beste regionale, nationale und internationale Kontakte zu allen relevanten Marktteilnehmern im Bereich Metallhandel, Metallrecycling und Metallverarbeitung.

materialnomaden (MNO) leisten Pionierarbeit für eine planerische Integration vorhandener Bauteile und Nutzung bereits verfügbarer Ressourcen im herkömmlichen Bauprozess. Als Fachplaner für Reuse begleiten sie Projekte von Small bis Big Scale bis zur Umsetzung im Maßstab 1:1. Seit vier Jahren (anfangs als harvestMAPeG) beschäftigen sie sich mit Bauteilaufnahmen, Bauteilkatalogisierung und dem prototypischen Wiedereinsatz von Reuse-fähigen Bauteilen. Mehr als 60.000 aufgenommene Bauteile diverser Stoffgruppen (Metalle, Holz, Holzwerkstoffe, mineralische Natur- und Kunststoffwerkstoffe, sowie diverse Verbundbauteile) wurden in ihre Datenbank eingepflegt und in diversen Bauprojekten wieder eingebaut und zur Verfügung gestellt. Durch die Vernetzung zu Superuse Studios und ReFunc in den Niederlanden können sie auf umfangreiches Wissen zurückgreifen, und so den Fokus auf Umsetzung von Prototypen und die Implementierung in Bauprojekten legen. Parallel dazu wurde mit HarvestMAP eG eine Plattform (re:store) ins Leben gerufen, die Professionisten dazu dienen soll, umfangreiche Informationen zu den aufgenommenen Bauteilen zu erhalten.

3.4.1. Ergebnisse aus anderen Projekten als Grundlage für DiCYCLE

BIMd.sign

Das Forschungsprojekt umfasst den Entwurf einer BIM-gestützten Planung mit Blockchain und Smart Contracts. Das Blockchain-Format und das integrale BIM-Framework werden dabei zusammengeführt und die Prozesse für die Erstellung von Smart Contracts für BIM-basierte Wertschöpfungsketten definiert. Auf diese Art und Weise wird die modellbasierte Kommunikation der unterschiedlichen Prozess-Teilhaber transparent gemacht, automatisiert, sowie eine holistische BIM-Blockchain Lösung für die Planung (BIMd.sign-Planung) erstellt. Dieses Projekt wird im Rahmen eines gemeinsamen transnationalen Forschungsvorhabens zwischen Deutschland und Österreich durchgeführt. Hierbei wird ein integraler Ansatz verfolgt, mit dem Ziel ein gemeinsames länderübergreifendes Framework zu schaffen für den BIM- und Blockchain-gestützten Wertschöpfungsprozess von Hochbau und Infrastruktur, entlang des Lebenszyklus, in den Phasen Planung, Bauen, und Betrieb. Die Erkenntnisse

aus dem Projekt BIMd.sign dienen als Basis für DiCYCLE und sollen im Laufe des Projekts auf die End-Of-Life Phase ausgeweitet werden.

Fördergeber: FFG, Projektnummer: 873842

BIMCHAIN/FMChain

Im Rahmen des Projekts wird untersucht, wie Prozesse der (technischen) Gebäudeverwaltung digitalisiert werden können. Der Fokus der Forschung liegt auf den technischen Voraussetzungen einer verteilten Umsetzung, sowie den dadurch geschaffenen Möglichkeiten. Die Anforderungen für die Digitalisierung verschiedener Prozesse wurden untersucht und ein Software-Framework definiert. Als Kernkomponente wird die Verwendung von Blockchain bzw. konkreter Smart Contract Technologien erprobt. Die Erkenntnisse aus dem Projekt FMChain dienen als Basis für DiCYCLE und sollen im Laufe des Projekts auf die End-Of-Life Phase ausgeweitet werden.

Fördergeber: FFG, Projektnummer: 873827

BIM4BEMS

BIM4BEMS sollte aufzeigen, dass eine Weiterverwendung der Informationen aus der Planung sowie „as-built“-Dokumentation großen Nutzen für den effizienten Betrieb eines Gebäudes hat. Für den Betrieb wurde das BIM-Datenmodell mit Planungsstand herangezogen und im Betrieb erweitert, indem Informationen hinzugefügt sowie Änderungen des aktuellen Gebäudestatus nachgezogen wurden. BIM4BEMS untersuchte Anwendungsfälle, die den Nutzen eines BIM-Modells in Kombination mit Energiemanagementsystemen (BEMS) im Betrieb darstellen und somit zu verbessertem Reporting und Erkennung von Ineffizienzen im bestehenden Gebäudebetrieb führen. Knowhow über die Erstellung eines integrierten BIM-Datenmodells mit seiner Struktur und Datenpunkten werden für DiCYCLE hilfreich für die Modellierung von E-o-L-Datenbeständen sein.

Fördergeber: FFG, Projektnummer: 854677

DCCD - DOCTORAL COLLEGE COMPUTATIONAL DESIGN

Das Hauptaugenmerk der Forschung liegt auf dem Geometriedatenaustausch zwischen Architektur und Tragwerksplanung, da der Daten- und Modellaustauschprozess dieser Disziplinen durch das IFC-Datenformat immer noch viele Kompromisse und große Anpassungen bei den Modellierungstechniken abverlangt, sowohl beim Architekten als auch auf der Seite des Tragwerksplaners. Die Entwicklung einer Methode zur Diskretisierung der BIM-Geometrie ist erforderlich, um die semantischen Unterschiede und die unterschiedlichen Anforderungen bei der Modellierung von Architektur und Tragwerksplanung zu überbrücken (z. B. Stütze-zu-Decke in der Architektur vs. Stab-zu-Fläche in FEM-Modellen). Es sollen Algorithmen entwickelt werden, um auftretenden Lücken, die durch geometrische Schnitte in der IFC-Geometrie (Koordinationsansicht) entstehen, zu lösen, um gültige und einsatzbereite Modelle für die FEM-Simulation zu erstellen. Es sollte eine Software entwickelt werden, mit der Benutzer IFC-Geometrie importieren, Automatisierungsverfahren für die Modellreparatur ausführen und die Reparaturergebnisse grafisch kontrollieren kann, bevor das Modell an die FEM-Software weitergegeben wird. Dieses Tool soll den Aufwand, der für die Anpassung der Architektur-BIM-Geometrie zum Zweck der Struktursimulation, signifikant reduzieren und einen effektiveren interdisziplinären BIM-gestützten Entwurfsprozess ermöglichen.

Fördergeber: TU Wien / FWF

DATAFILTER

Ziel der Forschungsarbeit ist die Entwicklung von Building Data Model (BDM)-Datenfiltern im big-BIM-Kontext, d.h. in der Trennung zwischen Aufgabenbearbeitung und Datenhaltung im Building Information Modeling für ausgewählte Bauprozessschritte. Dabei ist es wichtig, die Rule Sets (Auswahlregeln) für die Datenfilterung aus der Planung für die spezifischen Disziplinen zu entwickeln,

wie beispielsweise für die Anforderungen einer Windsimulation, thermischen Gebäudesimulation oder Kostenplanung. Die Daten sollen in IFC oder RDF Building Data Model bearbeitet werden. Dabei liegt der Fokus auf dem Datenfilterungsprozess, der nach dem Export, aber vor dem Import Datenmengen in disziplinspezifische Folgeprogramme stattfinden soll. Zudem sollen die Themenfelder der automatischen BCF-Generierung aus zwei IFC-Dateien (alternativ RDF) inklusive BIM-Snippets und die BCF-Generierung infolge von Vollständigkeits- und Formatprüfungen behandelt werden. *Fördergeber: STRABAG AG*

BIMaterial

Im Rahmen des Projekts wurde das Prozess-Design für einen materiellen Gebäudepass (MGP), gestützt durch BIM, erstellt, welcher die materielle Zusammensetzung eines Bauwerks dokumentiert. Der MGP dient als Planungs- und Optimierungswerkzeug bereits in frühen Planungsphasen in Hinblick auf den effizienten Materialeinsatz und späteren Rückbau, als Dokumentation für das Rezyklieren von Gebäuden und als Grundlage für einen urbanen Rohstoffkataster auf Stadt-Ebene. Im Rahmen des Projekts wurde eine Methodik für die automatisierte Generierung eines MGP entwickelt, welche die Kopplung mehrerer Werkzeuge beinhaltet. Dabei wurde das Gebäudemodell anhand des eigens entwickelten Modellierleitfadens, welcher die Anforderungen für das MGP-Modell vorgibt, mit BIM-Software (Graphisoft Archicad 21 / Autodesk Revit 2018) generiert. Die bidirektionale Schnittstelle zwischen der Materialdatenbank- und Analysewerkzeug BuildingOne und BIM-Software ermöglicht eine automatisierte Synchronisierung von Daten in beide Richtungen. Zudem ermöglicht das Materialdatenbank- und Analysewerkzeug die Attribuierung von einzelnen Schichten (mit z. B. Ökokennzahlen und für Recycling relevanten Daten), was in BIM zurzeit noch nicht in vollem Ausmaß möglich ist.

Fördergeber: FFG, Projektnummer 850049

SCI_BIM

Das Forschungsziel von SCI_BIM war die Entwicklung der Methodik und des Rahmenwerks für die Nutzung digitaler Scanning- und Modellierungstechnologien: Georadar für die Erfassung der materiellen Zusammensetzung eines Bestandsgebäudes gekoppelt mit Laserscantechnologie für die Geometrieerfassung, samt semi-automatisierter Generierung der as-built BIMs aus den durch Scannen erhaltenen Daten (Points to BIM; Material Scan to BIM). Aufbauend auf den aufgenommenen Scandaten und dem generierten BIM-Modell wurde ein MGP-Modell generiert, welches als Grundlage für das Ressourcenmanagement dient, sowie ein Building Energy Model (BEM), um unter anderem den Energieverbrauch zu optimieren. Durch die Gamification und Nutzerbeteiligung wurde das Potential gezeigt, Änderungen im Gebäude sowie das energetische Benutzerverhalten zu erfassen um somit das BIM-Modell instand zu halten. Durch eine Kosten-Effektivitäts-Analyse wurde genau analysiert, welche Kosten für die jeweiligen Workflows für die Generierung der verschiedenen MGP-Modelle verursacht wurden.

Fördergeber: FFG, Projektnummer 867314

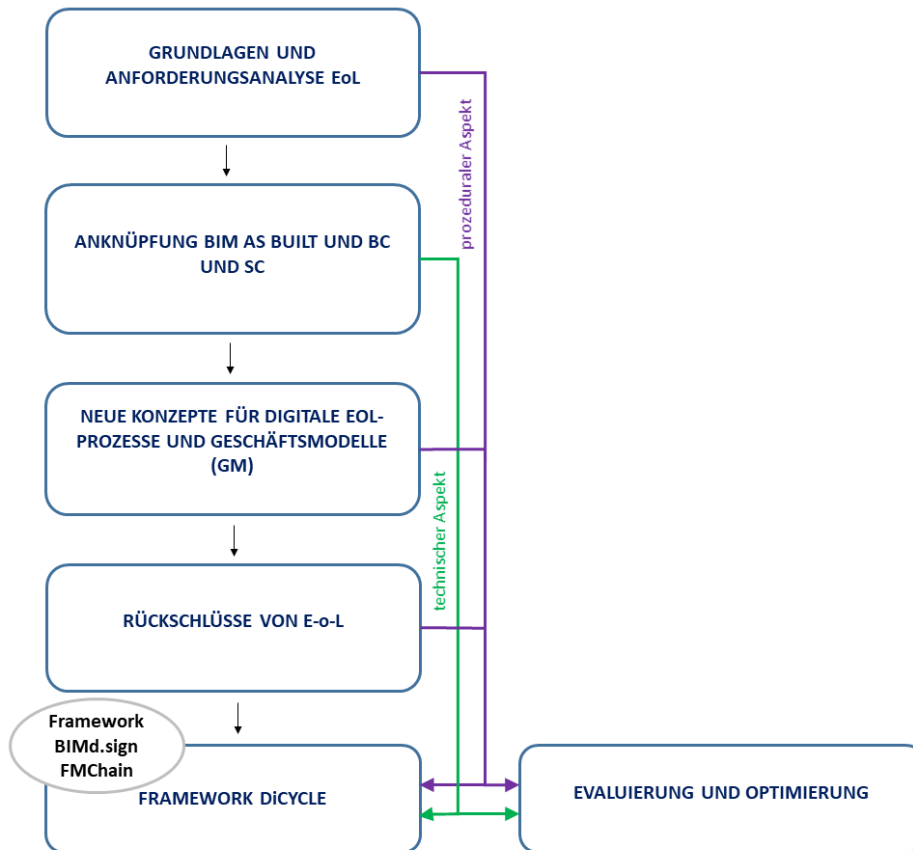
BIMstocks

BIMstocks ist ein derzeit laufendes FFG-Projekt, welches sich auf die Generierung einer Urban Mining Plattform für Wien durch Kopplung von BIM und GIS fokussiert. Es basiert auf den Vorgängerprojekten BIMaterial und SCI_BIM, wobei bei BIMstocks mehrere Bestandsgebäude mit unterschiedlichen Technologien erfasst und auf Stadt-Ebene hochskaliert werden. Im Rahmen des Projekts wird getestet, welches Potential eine digitale Urban Mining Plattform zum Abbilden des Bestands sowie zum Prognostizieren der Recycling- und Reuse-Potentiale von Materialien und Bauteilen hat. *Fördergeber: FFG, Projektnummer 879401*

4 Projektinhalt

Abbildung 3 zeigt den Workflow des Forschungsprojekts, in dem die beiden Aspekte - der prozedurale und technische - zusammengeführt werden und somit das Framework DiCYCLE entsteht. Dieses wird weiters, in Bezug auf beide relevanten Aspekte, evaluiert und optimiert.

Abbildung 3: Workflow DiCYCLE © 2022 TU Wien



Die Vorgangsweise für die Erarbeitung der Projektinhalte war wie folgt:

- ✓ **In der ersten Projektphase, wurde die Um- und Rückbauphase (E-o-L) dokumentiert und analysiert sowie die dafür notwendigen Datenbestände und Datenstrukturen identifiziert und festgelegt**

Dazu wurden zuerst bestehenden Wertschöpfungsketten in E-o-L untersucht und die gängigen Geschäftsmodelle für Wiederverwertung/-verwendung von Baumaterialien und Baukomponenten anhand von Fallstudien (von Projektpartnern FPB; AMK; MNO; 9 weitere Unternehmen) erforscht. Dabei wurden auch gesetzliche Rahmenbedingungen/Vorschriften, sowie die Rollen/Verantwortlichkeiten der Prozessbeteiligten identifiziert. Dafür wurden Anwendungsfälle untersucht, miteinander verglichen und Hürden und Potentiale der Zukunft ausfindig gemacht. Zusätzlich wurden bestehende Datenquellen, Datenstrukturen, Evaluierungsmethoden für E-o-L, sowie Softwarelösungen für E-o-L untersucht.

- ✓ **In der zweiten Projektphase wurden neue Geschäftsmodelle konzeptualisiert und daraus Szenarien entwickelt für eine Digitalisierung der E-o-L-Wertschöpfungskette.**

BIM Modelle wurden mit E-o-L-Informationen angereichert. Prozessabläufe und technische Grundlagen, sowie die Datenstrukturierung für eine BC-unterstützte Vorgehensweise zur Unterstützung der Wertschöpfungskette definiert. Es wurden SC für die Verbindung mit BIM entworfen. Neue GMs und daraus folgend entwickelte Szenarien für eine Digitalisierung der E-o-L-Prozesse wurden konzipiert, wobei Erkenntnisse zu Digitalisierungspotentialen aus BIMd.sign und FMChain berücksichtigt wurden. Entscheidungshilfen in der Planungsphase für E-o-L Prozesse wurden erarbeitet. Die Erkenntnisse aus den Vorprojekten BIMd.sign und FMChain wie z. B. prozedurale Anforderungen in den anderen LZ-Phasen wurden hier berücksichtigt.

- ✓ **In der dritten Projektphase wurde ein integrales Framework für E-o-L Prozesse definiert im welchem der technische & prozedurale Aspekt zusammengeführt wird**

Die Potentiale für eine Standardisierung und Automatisierung bestehender Arbeitsabläufe wurden nochmals überprüft, und daraus folgend die Voraussetzungen und Implementierungen für eine SC Anwendung in E-o-L identifiziert, welche eine effizientere und transparentere Wertschöpfungskette (der Kreislaufwirtschaft) im Lebenszyklus eines Gebäudes ermöglichen würden. Anhand der formulierten GMs, der definierten SCs und der BIM-E-o-L-basierten Datenverwaltung, wurden Testfälle (Prototyping) für E-o-L Prozesse und das *DiCYCLE-Framework* formuliert, und in Bezug auf Machbarkeit, Bedienbarkeit, Funktionalität und Skalierbarkeit evaluiert und optimiert. An den notwendigen Stellen wurde das DiCYCLE-Framework auch mit den Erkenntnissen aus den Projekten BIMd.sign und FMChain erweitert und verbessert, um das Rahmenwerk der E-o-L relevanten Prozesse besser abbilden und optimieren zu können.

Folgende Methoden kamen im Laufe des Projekts zur Anwendung:

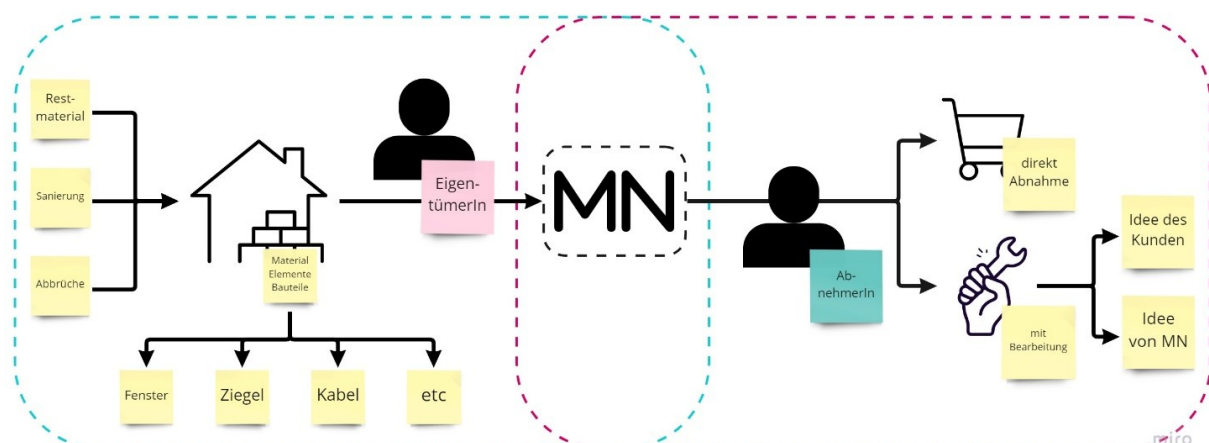
- Literatur Recherche
- Use Cases (basierend auf Yin, 2018; Dul & Hak, 2012)
- Experten-Interviews, Kategorisierung, Project Story
- Panel-Workshop
- Identifizierung der notwendigen Datenstrukturen/ Datenbasen/Software/Technologie für E-o-L; Potentiale der Digitalisierung
- Datenerhebung (wie z. B. über Gebühren/Abgaben und Erlöse von Bau- und Konstruktionsabfall. Ableitung von Planungskriterien)
- Dokumentation der E-o-L-Phase: Umsetzung, Voraussetzungen, Rahmenbedingungen
- System- Prozess- und Modellanalysen (u.a. mit System Dynamics)
- Evaluierung der E-o-L-Wertschöpfungskette und Prozesse
- Definition relevanter Komponenten neuer Geschäftsmodelle mit Hilfe des „Business Model Canvas“ (BMC) nach Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2010)
- Entwicklung von Bewertungsregeln
- Prozessmodellierung/Prozessdefinition in Business Process Model and Notation (BPMN)
- Technologie / Software Tests

Erläuterung der Erhebung und methodischen Herangehensweise:

1. Es wurden 12 Interviews mit unterschiedlichen Stakeholdern geführt, die einen Bezug zur E-o-L-Phase haben. Diese Interviews umfassten sowohl die am Projekt beteiligten Unternehmen

(Architekturbüro forschen planen bauen [FPB]; Kranner GmbH - Altmalme Kranner [AMK]; materialnomaden GmbH [MNO]), welche mit Ihren Prozessen und Geschäftsmodellen in dieser Lebenszyklusphase tätig sind wie auch 9 andere Unternehmen: ATP Sustain, Porr Umwelttechnik, Lindner Group, WertSecure GmbH, Wopfinger Transportbeton, RCH Recycling Center Himberg, Wirtschaftskammer Österreich, RM Umweltkonsulten ZT GmbH, sumami. Alle Interviews wurden anhand eines vom IBAU-Team entwickelten Fragebogens durchgeführt. Die Stakeholder deckten hierbei die Bereiche Nachhaltigkeits-Consulting in Rück- und Neubau, Baustoffproduzenten, Recycling, Projektentwicklung, Schad- und Störstofferkundung, sowie Materialprüfung ab. Mit Hilfe des Fragebogens wurden verschiedene **Prozesse und Wertschöpfungsketten** identifiziert, die verglichen werden konnten und dazu dienten, sich einen Überblick über die E-o-L-Phase zu verschaffen. Verschiedene **Akteure der E-o-L-Phase** wurden während der Interviews zu ihren Aufgaben, Potentialen und Hürden in den E-o-L-Prozessen befragt. Im ersten Schritt wurden die Prozesse und Wertschöpfungsketten der Projektpartner untersucht. Einige Interviewpartner waren auf bestimmte Materialien oder Materialgruppen fokussiert, andere auf die Phase, in der sie tätig sind, oder auf die Aufgaben, die sie ausführen. Die Interviewergebnisse halfen dabei, eine Standard-Wertschöpfungskette innerhalb der E-o-L-Phase zu entwickeln, die auf verschiedene Akteure anwendbar ist. Eine beispielhafte Untersuchung eines Projektpartners: Der Partner hat zwei Geschäftsmodelle. Das eine ist der Ankauf von Altmalme, dessen Sortierung, Lagerung und Vorbereitung für das Recycling mit dem Ziel der Herstellung von Rohmaterial. Das zweite ist das Geschäftsmodell, bei dem der Partner eingeladen wird, das im Gebäude gefundene Material zu bewerten, rückzubauen und abzutransportieren, und im Weiteren dem Hauptgeschäftsmodell zuzuführen. Zum Thema Wiederverwendung von Bauteilen und Produkten wurde ein beispielhafter Wiederverwendungsprozess entwickelt, welcher in Abbildung 4 dargestellt ist. Die Prozesse unterschieden sich hier, je nachdem ob Wiederverwendung, Recycling, oder eine sonstige Wiederverwertung angestrebt wird.

Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung des Wiederverwendungsprozesses von Baumaterialien und Bauelementen (Kotecki, 2022) © TU Wien



2. Aufbauend auf einer umfangreichen Literaturrecherche, sowie Analyse der Interviews aus der sozial-empirischen Forschung wurde die zu berücksichtigenden gesetzlichen **Rahmenbedingungen/Vorschriften** zusammengetragen, analysiert, und bei den entsprechenden

zugehörigen **Teilprozessen** verortet, sowie festgestellt für welche Stakeholder diese von Relevanz sind. Ähnlich wie in der Praxis und der Literatur gibt es auch in den Normen empfohlene und verbindliche Verfahren. Als vorbereitende Maßnahme der Rückbau-Planung steht eine Standortanalyse, welche die Erhebung potentieller Altlasten, die Abschätzung des Volumens oder der Masse eines Gebäudes (Inklusive Zuweisung von Abfall-Schlüsselnummern), sowie eine Schad- und Störstofferkundung und Entwicklung eines Rückbau-Konzeptes. Der Rückbau verschiedener Materialien wird auf jeweils unterschiedliche Weise geregelt. Manchmal handelt es sich um spezifische Verfahren für die Verarbeitung, manchmal um vorgeschriebene Tätigkeiten und meldepflichtige Mengen. Ein wichtiges Ergebnis ist, dass sich die Vorschriften immer wieder ändern, was sich in der Praxis manchmal als unpraktisch herausstellt.

3. Die E-o-L-Phase von Gebäuden ist der Übergangspunkt zwischen zwei Lebenszyklen der Bauprodukte und Baumaterialien, aber auch von Elementen und Bauteilen. Die für **die E-o-L-Phase relevanten Daten** (bezüglich Bauprodukten, Baumaterialien, Elementen und Bauteilen) sind diejenigen, die am Ende des letzten Lebenszyklus zur Verfügung stehen und zu Beginn des nächsten Gebäude-Lebenszyklus verwendet werden. Zusätzlich werden bestimmte Daten während der E-o-L-Phase neu erzeugt. Es gibt verschiedene Arten, den Lebenszyklus zu bewerten, von der Produktebene mit Environmental Product Declaration (EPD), GaBI, oder Baubook, (Produktdatenbanken), bis zu verschiedenen Arten der LCA-Analyse und Bewertung für gesamte Gebäude. Die auf dem Markt am meisten präsenten **Key-Performance Indikatoren** sind Gebäudezertifizierungssysteme und Gebäude-Materialpässe. Jedes Bewertungssystem hat seine eigene Parameterliste, die berücksichtigt wird, wobei oft proprietäre und nicht offene Daten verwendet werden. Diese **Parameterliste** wurde in einem weiteren Schritt auf BIM-Fähigkeit analysiert. E-o-L-Daten, die neu erzeugt werden, sind oft nicht für die Verwendung in anderen Systemen geeignet aufbereitet, weshalb kein holistischer Ansatz zur Integration der Daten vorliegt. Die bestehenden Bewertungssysteme beinhalten nicht genügend Details für die E-o-L-Phase und verfügbare, nachhaltige Wiederverwendungs- und Recyclinglösungen. Daher wurden im weiteren Projektfortschritt verschiedene Parameter von meist offenen Datenbanken verwendet und an bestehende Gebäudedatenstrukturen angepasst.

4. Spezifische **Softwarelösungen** für die E-o-L-Phase gibt es noch nicht auf dem Markt, abgesehen von den projekt- oder firmenspezifischen Lösungen. Die Akteure in der E-o-L-Phase verwenden verschiedene Lösungen und Datenbanken, die nicht spezifisch für die Bauindustrie entwickelt wurden und selten mit BIM Modellen verbunden sind. Es gibt allerdings auch verschiedene Werkzeuge, die vor und nach der E-o-L-Phase eingesetzt werden. E-o-L-Prozesse werden oft nicht auf dem neuesten Stand der Technik berücksichtigt, sondern Produkte und Materialien werden als Deponieabfall berechnet, obwohl es andere Möglichkeiten gibt, diese zu verwenden. E-o-L wird nur begrenzt in Life-Cycle-Assessment (LCA) Methoden berücksichtigt. In der LCA wird nur eine Nutzung berechnet, aber es gibt auch kleine Verkaufsplattformen, die eine Verbindung zwischen mehreren Lebenszyklen herstellen, bzw. eine tatsächliche Nutzung des Assets von einer Lebenszyklusphase in die andere ermöglichen. Die Einbettung von E-o-L-Parametern in BIM Modelle wurde nach einer detaillierten E-o-L-Phase-Analyse als nicht zielführend erkannt. Es wurde eine verbindende Ad-On-Struktur vorgeschlagen und entwickelt, die verschiedene Materialien und Produkte miteinander in Beziehung setzt. Die E-o-L-Parameter wurden identifiziert und aufgelistet. Sie müssen nicht in das ursprüngliche Modell eingebettet werden, sind aber erforderlich, um in der E-o-L-Phase digital weiterarbeiten zu können. Wie bei **BIM-Modellen** werden den eindeutigen **Material- und Bauteilbegriffen** die eingebetteten Emissionen wie CO₂, SO₄ oder andere zugeordnet. Die genauen Parameter wurden durch LCA und

Emissionsberechnungen bestimmt. Die derzeit verwendeten Begriffe sind oft nicht einheitlich, was jedoch essentiell ist, damit sie „maschinenlesbar“ sind. Für die weiteren Schritte wurden in erster Linie die Begriffe der IFC (Industry Foundation Classes) verwendet, und darüber hinaus die Materialien der IBO-Datenbank. Die Werte wurden weiterhin mit verschiedenen Datenbanken verknüpft.

5. 2024 wurde von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) mit der **Normenfamilie 59000**¹² ein umfassendes Regelwerk veröffentlicht, mit dem Ziel Standards für die Kreislaufwirtschaft (CE) zu schaffen. Auf diesem Weg wurden Teilbereiche kreislaufwirtschaftlichen Handelns und Wirtschaftens standardisiert, um das Verständnis der Kreislaufwirtschaft zu harmonisieren und deren Umsetzung und Messung zu unterstützen (ISO 59004:2024). ISO-Norm 59010 trägt den Titel „Circular economy — Guidance on the transition of business models and value networks“. Sie hat zum Ziel Unternehmen bei der Umwandlung ihres Geschäftsmodells hin zu einer Kreislaufwirtschaft zu unterstützen. Zu diesem Zweck werden typische Elemente eines Geschäftsmodells betrachtet, die das aktuelle Wertschöpfungsmodell ausmachen. Dabei bedient sich die ISO 59010:2024 eines etablierten Werkzeuges zur Beschreibung von Geschäftsmodellen, dem Business Model Canvas (BMC) von Osterwalder und Pigneur (2010) (s. Abb. 5) - welches auch im Rahmen von DiCYCLE herangezogen wurde - und erweitert dessen Definitionen um einige für die CE typischen Aspekte. Das BMC von Osterwalder und Pigneur (2010) beschreibt *neun Elemente* eines Geschäftsmodells:

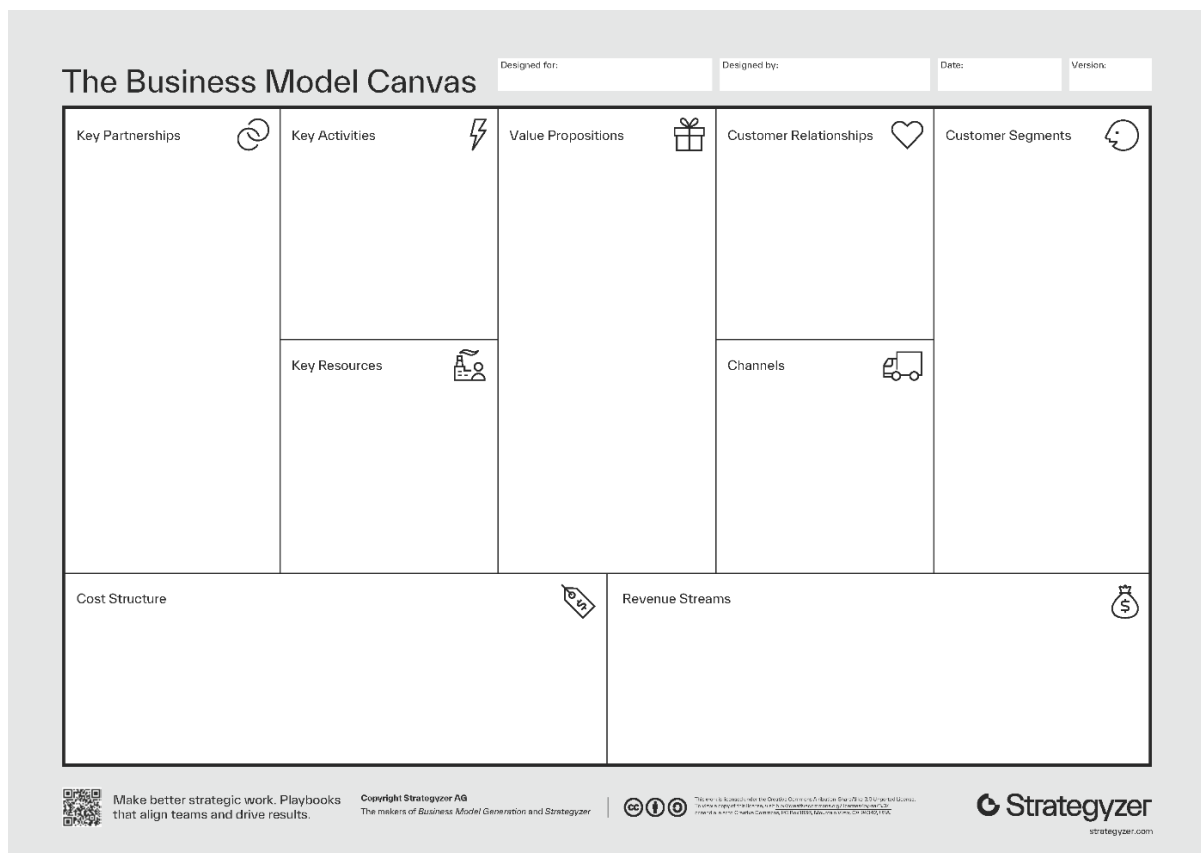
- Wertangebot (*value proposition*) - welches Produkt/Dienstleistung bietet ein Unternehmen an bzw. welches Problem/Bedürfnis eines Kunden löst/befriedigt es
- Schlüsselaktivitäten (*key activities*) - welche Aktivitäten werden regelmäßig durchgeführt, um das Wertangebot zu liefern oder das Geschäft zu betreiben
- Schlüsselressourcen (*key business resources*) - welche Ressourcen werden vom Unternehmen benötigt, um das Wertangebot bereitzustellen
- Kundensegmente (*customer segments*) – sind Branche, Unternehmensgröße und geografischer Standort des Kunden bei B2B; sowie demografische, geografische und psychografische Parameter der Kunden im Falle von B2C
- Kundenbeziehungen (*customer relationships*) - Erwartungen der Kunden an die zur Verfügung gestellten Produkte/Dienstleistungen; Faktoren, die bei der Bindung der Kunden an das Unternehmen eine Rolle spielen; Kommunikation mit den Kunden
- Kanäle (*channels*) - Art und Weise wie die erbrachte Dienstleistung/Produkt geliefert oder zur Verfügung gestellt wird; Orte an denen Dienstleistung/Produkt genutzt oder gekauft wird
- Kosten (*costs*) - entstehen bei Erbringung/Produktion der Dienstleistung/Produkts des Unternehmens. In ISO 59010:2024 erweitert **um die Betrachtung der Umwelt- und Sozialkosten, welche durch die Tätigkeiten des Unternehmens entstehen.**
- Einnahmeströme (*revenue streams*) - Zahlungen der Kunden für das Produkt/Dienstleistung des Unternehmens. In ISO 59010:2024 erweitert **um mögliche Einnahmen aus dem Handel mit Materialien sowie Einnahmen aus der Behandlung und Entsorgung von Materialien;** sowie der **Berücksichtigung staatlicher Subventionen** - dieses wirtschaftspolitische Steuerungsmittel spielt insofern eine wichtige Rolle, da eine Verlagerung der Subventionierung linearwirtschaftlicher Wirtschaftsmodelle hin zu Wirtschaftsmodellen der Kreislaufwirtschaft politisch gewollt ist (Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie

¹² <https://www.din.de/de/din-und-seine-partner/presse/mitteilungen/circular-economy-erste-internationale-normen-veroeffentlicht-1100006> (abgerufen am 10. 04 2025; 14:20)

2022¹³). Durch diese Erweiterungen werden neue Geschäftsmodelle und veränderte Materialströme in der Kreislaufwirtschaft gefördert.

- Schlüsselpartner (*key partners*) – Unternehmens-Geschäftspartner welche Ressourcen bereitstellen oder die Geschäftsmöglichkeiten des Unternehmens erweitern. Im Unterschied zum BMC sieht ISO 59010:2024 vor, **an dieser Stelle auch interessierte Parteien, die Druck auf das Unternehmensgeschäft ausüben können oder Erwartungen daran stellen, zu berücksichtigen.** Auch wenn diese außerhalb des betrachteten Wertschöpfungsnetzwerkes stehen.

Abbildung 5: Business Model Canvas von Alexander Osterwalder & Yves Pigneur (www.strategyzer.com), lizenziert unter CC BY-SA 3.0

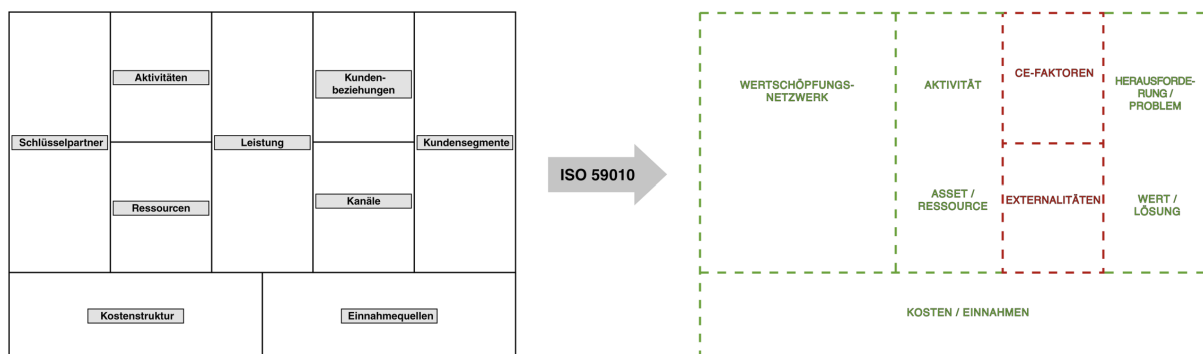


Anders als das BMC von Osterwalder und Pigneur (2010), sieht ISO 59010:2024 vor, auch externe Elemente zu betrachten, die vom Unternehmen kaum oder gar nicht beeinflusst werden können. Zu ihnen zählen etwa genutzte öffentliche Ressourcen, benötigte Infrastruktur, genutzte Technologien, Ökosystemdienstleistungen, Umwelterziehung, Trends und Anforderungen der ESG-Strategie, Gesetze und Vorschriften sowie soziale und demografische Tendenzen. ISO 59010:2024 betont, dass bei der Analyse von Geschäftsmodellen der Kreislaufwirtschaft nicht einzelne Wertschöpfungsketten betrachtet werden sollten, sondern das übergeordnete Wertschöpfungsnetzwerk. Unter Wertschöpfungsnetzwerk wird hier ein Netzwerk miteinander verbundener Wertschöpfungsketten und interessierter Parteien verstanden. Des Weiteren wird erwähnt, dass Kunden im Rahmen der CE, auch zu Lieferanten und somit zu Partnern werden können. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn

¹³ https://www.bmimi.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/Kreislaufwirtschaft/strategie.html (abgerufen am 10. 04 2025; 09:15)

Rücknahmeverträge ihre Wirkung entfalten und der Kunde ein Produkt, nach dem Eintreten zuvor vereinbarter Bedingungen, an den Hersteller zurückgibt oder ein zuvor erworbenes Produkt dem Recycling zugeführt wird. Also ist eine klare Trennung zwischen Lieferanten und Kunden bei der Betrachtung einer funktionierenden CE häufig nicht zielführend. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde in DiCYCLE ein **überarbeitetes BMC abgeleitet** (s. Abb. 6). In diesem werden die zuvor definierten Elemente des Geschäftsmodells, Kundensegmente, Kundenbeziehungen, Schlüsselpartner und Kanäle, unter dem Begriff des Wertnetzwerks zusammengefasst. Außerdem wird das BMC um die von ISO 59010:2024 betrachteten externen Elemente sowie die typischen CE-Faktoren erweitert. Unter dem Begriff CE-Faktoren werden jene Elemente zusammengefasst, die nur bei der Betrachtung von CE-Geschäftsmodellen von Relevanz sind, jedoch bei linearen Geschäftsmodellen keine Rolle spielen bzw. nicht vorkommen. Hierzu zählen Schlüsselleistungsindikatoren (key performance indicators [KPIs]) die zum Verstehen der Zirkularitätsleistung (circularity performance) notwendig sind und weitere Gegebenheiten, die aus dem kreislaufwirtschaftlichen Handeln eines Unternehmens erwachsen.

Abbildung 6: Angepasstes Business Model Canvas basierend auf Business Model Canvas (Osterwalder & Pigneur, lizenziert unter CC BY-SA 3.0) und ISO 59010. Weiterentwicklung und visuelle Überarbeitung: TU Wien, 2025



6. System Dynamics (SD) ist ein Modellierungsansatz, der in den 1950er Jahren von Jay Forrester¹⁴ am MIT entwickelt wurde, um die Komplexität dynamischer Systeme besser zu verstehen und effektive Kontrollstrategien zu entwerfen. Er kombinierte Elemente aus der Kontrolltheorie, der nichtlinearen Dynamik und den Sozialwissenschaften. Die Methode zeigt auf, wie interne Strukturen und Interaktionen innerhalb eines Systems zu unbeabsichtigten Nebeneffekten führen können - bekannt als „politische Widerstände“ -, bei denen gut gemeinte Eingriffe scheitern oder neue, unerwartete Probleme auslösen (Sterman, 2000).

Um den Übergang zu einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft gezielt und wirksam zu gestalten, ist die Integration einer systemischen Sichtweise – also eines dynamischen Simulationsmodells – ein wesentliches Instrument. Ein solches Modell kann helfen, die systemische Komplexität der Kreislaufwirtschaft besser zu verstehen und darauf basierend fundierte Steuerungsstrategien und Geschäftsmodelle zu entwickeln. Die im DiCYCLE-Projekt angewandte SD-Methodik wurde gezielt eingesetzt, um ein tiefgehendes Verständnis der bestehenden E-o-L-Prozesse sowie der damit verbundenen Geschäftsmodelle zu gewinnen. Die Modellierung liefert eine strukturierte Basis, um zentrale Hebelpunkte für Prozessoptimierungen und mögliche kontraproduktive Effekte aufzudecken.

¹⁴ <https://systemdynamics.org/origin-of-system-dynamics/> (abgerufen am 10. 04 2025; 09:17)

Auf diese Weise konnten Potenziale, aber auch Hindernisse und Herausforderungen im Prozess erkannt und systematisch analysiert werden. Als erstes Ergebnis dieser Herangehensweise ergab sich ein idealisiertes Prozessmodell eines Closed-Loop Material und Daten-Prozesses, welcher in Kapitel 5 näher erläutert wird.

7. Die Use Cases dieses Forschungsprojekts werden außerdem mit der **3A (Actor/Activity/Asset) Methode** für Prozessanalysen (im FFG-Projekt BIMd.sign entwickelt; Sibenik et al., 2022a) untersucht. Die Gliederung in Actor/Activity/Asset ist zentral für den Top-Down/Bottom-Up Ansatz für die zu betrachtenden Geschäftsbeziehungen, Prozessschritte und Elemente. Die Kategorie **Actor** umfasst sämtliche Stakeholder und beteiligte Akteure, deren Interessen und Rollen innerhalb der betrachteten Prozesse klar definiert und abgegrenzt werden können. Die **Activity** Ebene bezieht sich auf konkrete Handlungen und Tätigkeiten, die von den einzelnen Akteuren durchgeführt werden und deren Abfolge sowie Interaktionen im Modell systematisch dargestellt sind. Unter **Asset** werden sowohl physische Ressourcen und Materialien als auch digitale Ressourcen wie BIM-Daten und Materialinformationen erfasst. Die klare Abgrenzung und Zuordnung dieser drei Kategorien gewährleistet eine strukturierte Erfassung und Modellierung aller relevanten Aspekte – (s. Kapitel 5).

8. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Vorgängerprojekten FMChain (FFG-Nr. 873827) und BIMd.sign (FFG-Nr. 873842) wurde in DiCYCLE die entwickelte Systemarchitektur für Blockchain und Smart Contracts weiterentwickelt. Im Vergleich zu diesen ersten Entwicklungen, wo im Bereich des Geschäftsprozessmanagements in Kombination mit Blockchains der gesamte Prozess auf Blockchains abgebildet wurde, wurde hier ein neuer Weg eingeschlagen, welcher mittlerweile auch in der akademischen Literatur mehr und mehr Anklang findet. Der Ansatz, alle Daten (inklusive der Akteure, Gateways, etc.) auf der Blockchain abzubilden, ist aus mehreren Gründen problematisch:

- ✓ Zum einen werden grundlegende Privatsphäre Anforderungen der Unternehmen gebrochen: Unternehmen möchten i.d.R. unter allen Umständen vermeiden, dass Daten, die ihren Geschäftsprozessen zugeordnet werden können (insbesondere, wenn es sich um Supplychain Daten handelt), von Dritten eingesehen werden können. Dies wurde unter anderem auch von unseren Interviewpartnern im Zuge der Anforderungsanalyse nochmal bekräftigt.
- ✓ Weiters ist das Ablegen von Daten auf Blockchains auch aufgrund von zu zahlenden Transaktionskosten eher unattraktiv. Das gilt insbesondere für die sogenannten *public* Blockchains, wie Bitcoin oder Ethereum. Diese sind, wie der Name suggeriert, für jeden einsehbar und bieten auch die Möglichkeit, dass sie jeder verwenden kann. Das ist aber wiederum auch nachteilig, da durch die beschränkte mögliche Anzahl an Transaktionen pro Sekunde von Teilnehmern zum Teil hohe Transaktionskosten gezahlt werden müssen. *Private* Blockchains, also Blockchains, die nicht von jedem eingesehen werden können und nur von einer kleinen Anzahl an Teilnehmern betrieben werden, haben diese Limitierung wesentlich weniger, haben aber andere Nachteile, wie ein größeres Zentralisierungsrisiko oder mangelnde Annahme der Technologie in der Industrie.

Neben der genannten Entscheidung, einen stärkeren Fokus auf die Aspekte Privatsphäre und Skalierbarkeit einer Blockchain (BC)-basierten Anwendung zu legen, wurde in DiCYCLE ein Ansatz gewählt, bei welchem möglichst wenig Daten auf der BC abgelegt werden müssen bzw. nur so viele, dass die positiven Eigenschaften der BC noch am besten genutzt werden können.

Ein zentrales Element des Projekts stellt auch der Einsatz von Zero-Knowledge Proofs (ZKPs) dar, welcher mit dem Use Case ReParkett der Materialnomaden prototypisch dargestellt wird. Der Use Case

ReParkett wurde weiterentwickelt und im Zuge dessen ein einfaches User Interface entwickelt (siehe auch Kapitel 5).

4.1.1. Angewendete Methoden in der Umsetzung

- Aufgrund der Anzahl von 12 Interviews sind gewisse Einschränkungen in den Ergebnissen zu berücksichtigen. Diese Interviews lieferten zwar wertvolle Perspektiven und trugen zur Tiefe der Analyse bei, doch aufgrund ihrer begrenzten Anzahl können sie die Vielfalt und Bandbreite der Erfahrungen in der gesamten Branche möglicherweise nicht vollständig erfassen. Folglich sollten die Ergebnisse unter Berücksichtigung dieser Einschränkung interpretiert werden, wobei zu berücksichtigen ist, dass sie möglicherweise nicht alle potenziellen Standpunkte oder Szenarien im weiteren Umfeld umfassen. Diese diene jedenfalls als Basis für die weitere Forschung.
- Die detaillierten halb-strukturierten Interviews mit Fachexperten waren jedoch als Methodik besonders nützlich, um die Nuancen praktischer Herausforderungen und Lösungen zu verstehen. Während beispielsweise in der Literatur die theoretischen Vorteile des Einsatzes digitaler Tools wie Building Information Modeling (BIM) und Blockchain für die Integration von CE hervorgehoben werden, können die Interviews spezifische Fälle aufzeigen, in denen diese Tools erfolgreich implementiert wurden oder auf Hindernisse stießen. Dies bietet einen umfassenderen Überblick über die praktischen Aspekte bei der Einführung solcher Technologien.
- Die Effekte eines effizienteren und qualitativ besseren BIM-gestützten Um- und Rückbauprozesses, welcher durch die Anwendung von SC und BC entsteht, lassen sich derzeit nur schwer quantifizieren, da die Implementierung dieser Technologien, in Kombination mit BIM empirisch nur durch BIMd.sign und FMChain erforscht wurde. Neue Technologien und Werkzeuge verlangen eine verstärkte Integration der Prozesse und Beteiligten im Lebenszyklus eines Gebäudes, jedoch laufen etwa Planungs- und Bauprozesse derzeit noch immer sequenziell und fragmentiert ab. Um- und Rückbauprozesse sind noch gar nicht standardisiert oder für eine Digitalisierung adaptiert. Derzeit bestehende mangelhafte Software-Interoperabilität, fehlende Verknüpfungen oder Integration von Daten für E-o-L mit BIM sind gleichfalls schwer quantitativ fassbar.
- Die im Rahmen des Forschungsprojekts DiCYCLE adressierte Forschungslücke betrifft insbesondere die integrative Sichtweise von End-of-Life Daten und -Prozessen sowie deren systematische Verknüpfung mit bestehenden digitalen Datenbeständen und Systemen. Weiterhin umfasst die Forschungslücke die Entwicklung und Anwendung überprüfbarer Ablaufprozesse mittels Blockchain und Smart Contracts. Dazu ist der Hintergrund der Problemstellung, dass im aktuellen Stand der Forschung und Praxis häufig eine isolierte Betrachtung der E-o-L-Prozesse vorherrscht. Bestehende Datengrundlagen aus der BIM-Planung und -Nutzung, die während des gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks gesammelt werden, bleiben oftmals ungenutzt oder werden nicht mit den tatsächlichen Rückbau-, Wiederverwendungs- und Recyclingprozessen systematisch verbunden. Ebenso fehlen aktuell weitestgehend valide, automatisierte Verfahren, um die Prozesse am Ende des Lebenszyklus transparent, nachvollziehbar und manipulationssicher zu dokumentieren und zu überwachen. Um diese Forschungslücke gänzlich adressieren und methodisch aufzuarbeiten, wurde im Projekt auf die methodische Anwendung der System-Dynamics-Modellierung, einer Methode, die besonders geeignet ist, komplexe Systeme ganzheitlich abzubilden, zurückgegriffen. Mit

SD-Modellen können wesentliche Prozesse, Einflussfaktoren und Hebelpunkte im End of Life sichtbar gemacht werden. SD-Modellierung ermöglicht es im Projekt, dynamische Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Akteuren und Prozessen aufzuzeigen.

- Die mit dem Forschungsvorhaben beabsichtigte integrale Gesamtoptimierung, durch die Anwendung digitaler Technologien im E-o-L eines Gebäudes, durch das DiCYCLE Framework, Evaluieren und Optimieren anhand von Studienfällen und des Proof-of-Concept, hat eine empirische Erfassung der Potentiale ermöglicht, die mit diesen Technologien im Lebenszyklus eines Gebäudes möglich sind, wie: Transparenz, Verfolgung der Prozessschritte (Protokoll), Echtzeitkommunikation; und schafft somit einen wissenschaftlich fundierten Beitrag für die Digitalisierung der Wertschöpfungsprozesse der Kreislaufwirtschaft in der AEC Industrie.

5 Ergebnisse

5.1. Dokumentation und Analyse der Prozesse im End-of-Life

Die Forschungsmethodik umfasste zwölf halbstrukturierte Interviews (siehe auch Kapitel 4) mit verschiedenen Fachexperten, die an Aktivitäten innerhalb der E-o-L-Wertschöpfungskette beteiligt sind. Die Interviews wurden in einem Zeitraum von 6 Monaten durchgeführt, mit dem Ziel, die folgende Forschungsfrage zu beantworten: *Wie ist der aktuelle Status quo in Österreich in Bezug auf CE-Geschäftsmodelle, mit Schwerpunkt auf der E-o-L-Phase?* Der Fokus lag auf der Dokumentation und Exploration der bestehenden Wertschöpfungsketten in der E-o-L-Phase und der Prozesse für Recycling und Reuse von Baumaterialien und Bauelementen/-teilen aus der Perspektive der Befragten.

5.1.1. Stakeholder-Beziehungen

Um die Interaktionen der Interviewpartner und ihr Fachgebiet zu verstehen, gibt Abbildung 7 einen Überblick über ihre Verknüpfungen, die zu direkten und indirekten Verbindungen in ihrer jeweiligen AEC-Wertschöpfungskette führen. Vier wichtige Interessengruppen können anhand ihrer Bedeutung, Rolle und Interaktionen im Prozess identifiziert werden. Im Folgenden werden die vier Gruppen kurz beschrieben.

Erstens konzentrieren sich die „Aufsichtsbehörde“ und die „Gebäudebewertung“ (1) auf Rahmenbedingungen und Richtlinien für Bauprojekte und den damit verbundenen Rückbau. Darüber hinaus stellen aktuelle Zertifizierungen zusätzliche Anforderungen für Neubauten im Allgemeinen sowie für den Abriss bestehender und neuer Bauwerke. Daher besteht eine direkte und indirekte Verbindung zur E-o-L-Gruppe 4. Im Allgemeinen hat Gruppe 1 durch direkte oder indirekte Verbindungen einen erheblichen Einfluss auf alle anderen Gruppen.

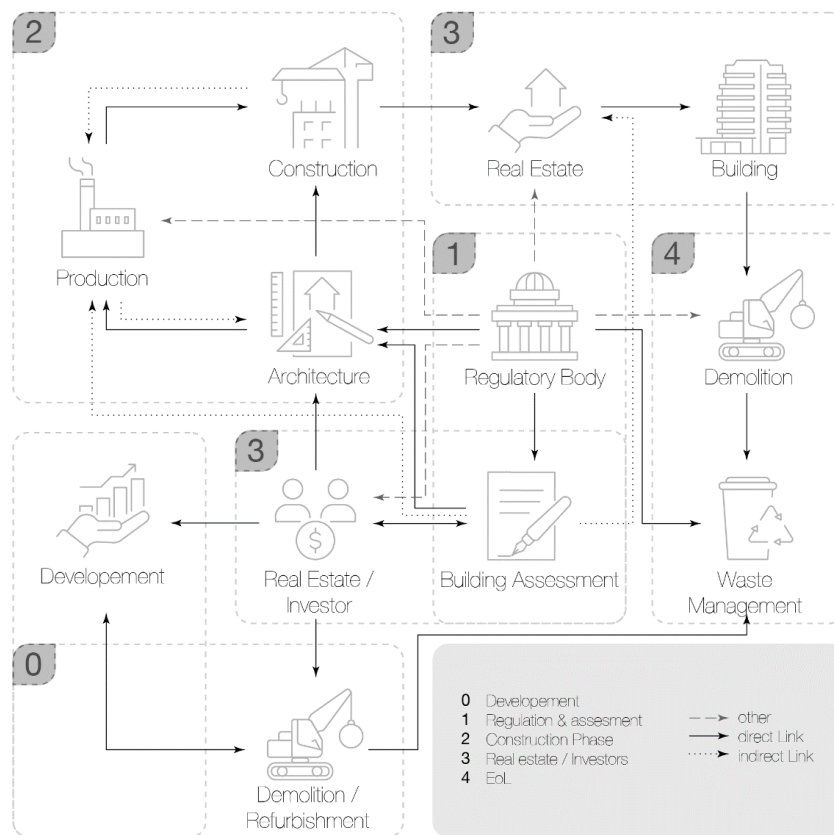
Die zweite Gruppe (2) umfasst Interessengruppen, die für die physische Ausführung eines Bauprojekts verantwortlich sind, darunter „Architekten“, „Bauunternehmen“ und „Baustoffhersteller“. Sie beeinflussen sich gegenseitig kontinuierlich durch neue Produkte, Verfahren und/oder Konzepte vor und während des Bauprozesses.

Der „Immobiliensektor“ (3) als Interessengruppe (z. B. Investoren, Finanziere, Auftraggeber, Kunden, Entwickler, Gebäudeeigentümer usw.) spielt eine entscheidende Rolle bei der Initiierung eines Bauprojekts und der Verwaltung (z. B. Facility Management) sowie bei der Entscheidung über den Beginn, den Betrieb und das Ende eines Projekts, wobei er in erster Linie von finanziellen Interessen geleitet wird. Die Gruppe „Immobilien“ kann als dynamischer Stakeholder betrachtet werden, der seine wirtschaftliche Funktion und Nützlichkeit während des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes beibehält, auch wenn sich der Eigentümer aufgrund der Beschränkungen des Gebäudes ändert. Diese Gruppe hat den größten Einfluss auf den Prozess, wenn die „Regulierungsbehörde“ vernachlässigt wird. Ein besonderes Merkmal der Gruppe 3 ist, dass sie als Initiator fungiert und das Ende des Lebenszyklus eines Gebäudes bestimmt.

Der vierte Pool (4) umfasst alle an der E-o-L-Phase beteiligten Parteien, die in direktem Zusammenhang mit dem Rückbau und der Materialverwertung stehen, wie Abbruchunternehmen, Recycling- und Abfallentsorgungsanlagen sowie Deponien. Für diese Gruppe ist, wie bereits erwähnt, ihr Prozessablauf und die Qualität ihrer Arbeit mit Gruppe 2 verbunden. Die Qualität, Organisation und Gestaltung des Rückbauprozesses wird direkt von der Qualität der Planung, Ausführung und Produkte

in Gruppe 2 beeinflusst. Wie in Abbildung 7 dargestellt, sind die Teilnehmer aus Pool 4 daher am Ende des Lebenszyklus eines Gebäudes beteiligt, müssen jedoch während der gesamten Lebensdauer des Entwurfs-, Bau- und Betriebsprozesses berücksichtigt werden. Ein erfolgreicher Rückbau und das Potenzial für eine Wiederverwendung hängen von der Integration dieser Faktoren als „Entwurf für den Rückbau“ ab. Die frühzeitige Einbeziehung dieser Überlegungen ist von entscheidender Bedeutung, um sicherzustellen, dass Gebäude unter Berücksichtigung eines zukünftigen Rückbaus und der Wiederverwendung von Materialien entworfen werden, was für nachhaltige Baupraktiken und die Kreislaufwirtschaft von wesentlicher Bedeutung ist.

Abbildung 7: Interviewpartner und ihre Verknüpfungen (Srećković et al., 2024)
 © Marijana Srećković, Dominik Hartmann, Stefan Schützenhofer, Alexandra Kotecki



5.1.2. Bewertungen von CE und E-o-L

Die Experteninterviews zu Kreislaufwirtschaft und Wiederverwendung/Recycling in der AEC zeigen eine Vielzahl von Herausforderungen, Erkenntnissen und potenziellen Lösungen auf. Im Folgenden werden die wichtigsten allgemeinen Aussagen und Meinungen der Experten zusammengefasst.

Ein grundlegender Konsens besteht in der Notwendigkeit eines schrittweisen Übergangs zu nachhaltigeren Praktiken. Ein sofortiger Umstieg auf ausschließlich erneuerbare Ressourcen wird als nicht praktikabel erachtet. Auf dieser Grundlage heben die Experten das derzeitige Wachstumsmuster in der Branche als nicht nachhaltig hervor, was in erster Linie auf die Komplexität der Bau-, Rückbau- und Gesamtkoordinierungsprozesse zurückzuführen ist. Dies unterstreicht die Notwendigkeit effizienterer Planungs-, Demontage- und Logistik-/Prozesssysteme. In Bezug auf die praktischen

Auswirkungen sind dies wichtige Punkte, die es zu überwinden gilt. Eine eher theoretische, aber dennoch problematische Beobachtung ist, dass in der Öffentlichkeit und bei Bauherren ein besseres Bewusstsein für den sozialen und finanziellen Wert der Kreislaufwirtschaft geschaffen werden muss. Ein Grund dafür ist, dass die Produktidentität in Bezug auf Informationen über ihre Herkunft und Rohstoffzusammensetzung oft nicht hinterfragt wird, was die Möglichkeit des Recyclings oder der Wiederverwendung behindert. Daher könnte eine klare Dokumentation, möglicherweise durch Technologie (z. B. Blockchain und Smart Contracts), die Transparenz und Rückverfolgbarkeit über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg verbessern. Aktuelle digitale Lösungen wie das elektronische Datenmanagement (EDM)¹⁵ für Abfall- und Recyclingprozesse in Österreich bieten jedoch nur begrenzte Problemlösungsfähigkeiten. Bedenken hinsichtlich der Datengenauigkeit und -kontinuität führen dazu, dass Lösungen wie das EDM in Österreich kritisiert werden. Darüber hinaus sind Insellösungen nicht von Dauer. Für einen interdisziplinären Ansatz ist die Zusammenführung aller Beteiligten und Prozesse in einem einzigen digitalen Raum erforderlich.

Ein weiteres allgemeines Thema ist die Diskrepanz zwischen Rentabilität und Risiko beim Rückbau und potenziellen Abbruchgütern für die Wiederverwendung. Es gibt vielfältige Gründe für Rentabilität und Risiko, doch die am Häufigsten genannten Probleme in den Interviews sind Ungenauigkeiten bei der Schätzung der Massen sowie mangelndes Wissen über die tatsächliche Qualität der Materialien im Objekt und deren Standort. Darüber hinaus führt die späte Vergabe von Abbrucharbeiten, oft durch Direktvergabe statt durch Ausschreibungen, in Kombination mit logistischen Herausforderungen und dem Flächenmanagement bei der Sortierung von Bauschutt zu Schwierigkeiten bei der Umsetzung und Rentabilität des Rückbauprozesses.

Die Interviews zeigen, dass die effektive Umsetzung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen eine Kombination aus technologischen, normativen und kulturellen Veränderungen erfordert.

5.1.3. Gesetze, Normen und Vorschriften

Die Analyse der Experteninterviews zu Gesetzen, Normen und Vorschriften im Bereich der Kreislaufwirtschaft sowie der Wiederverwendung und des Recyclings im Bauwesen zeigt ein komplexes Geflecht an Regelwerken, die die Umsetzung dieser Praktiken maßgeblich beeinflussen. Dieser Abschnitt beleuchtet die zentralen Rechtsvorschriften, Normen und Rahmenbedingungen sowie die Einschätzungen der befragten Experten, einschließlich möglicher Reformvorschläge.

Für die erfolgreiche Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in Österreich spielen Normen wie die ÖNORMEN B 3140 und B 3151 sowie die ISO 14000-Serie eine Schlüsselrolle. Die EU-Bauproduktenverordnung (EU) Nr. 305/2011 (CPR)¹⁶ und das österreichische Akkreditierungsgesetz¹⁷ (2012) sind eng miteinander verknüpft. Sie regeln die Qualität und Sicherheit von Baustoffen sowie die Akkreditierung von Prüfstellen und beeinflussen somit direkt die Materialproduktion, -prüfung und die Vergabe der CE-Kennzeichnung. In der End-of-Life-Phase von Gebäuden sind Abfallbilanzberichte und Abfallschlüsselnummern, die im Abfallwirtschaftsgesetz (AWG) verankert sind, von zentraler Bedeutung. Das AWG bildet die Grundlage für die Abfallregulierung in Österreich und umfasst Kernaspekte wie Abfallvermeidung, -minimierung und -bewirtschaftung, die Abfallhierarchie, Umwelt- und Gesundheitsschutz, Lizenzierung, Überwachung sowie Berichtspflichten. In Wien arbeiten die Umweltbehörde MA 22 und die MA 48 (Abfallwirtschaft) eng zusammen, um diese Vorgaben

¹⁵ https://edm.gv.at/edm_portal/home.do (abgerufen 8.4.2025; 12:55)

¹⁶ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/TXT/?uri=CELEX:32011R0305> (abgerufen 10.4.2025; 15:20)

¹⁷ <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20007798> (abgerufen 10.4.2025; 15:25)

umzusetzen. Ergänzend fördern die Recycling-Baustoff-Verordnung (2015)¹⁸ und die Abfallverzeichnisverordnung (2020)¹⁹ das Recycling und die Kreislaufwirtschaft.

Auf europäischer Ebene spielt die EU-Taxonomie, die Rückbauvorschriften und Ökobilanzen umfasst, eine zentrale Rolle bei der Förderung nachhaltiger Baupraktiken. Normen für Rückbaukonzepte und Ökobilanzen sind essenziell, um Methoden und Standards für nachhaltiges Bauen zu definieren und deren Umsetzung quantifizierbar zu machen. Die EU stellt hierfür Leitlinien und Empfehlungen bereit, deren Umsetzung jedoch in die Verantwortung der Mitgliedstaaten und ihrer Bundesländer fällt.

Die befragten Experten nannten größtenteils übereinstimmende Gesetze, wobei sich die Schwerpunkte je nach Branche leicht unterscheiden. Einhellig kritisierten sie jedoch die Komplexität und Vielzahl der Regelwerke sowie teilweise zu strenge regulatorische Grenzwerte und Zertifizierungsanforderungen. Häufig seien Gesetzestexte widersprüchlich oder würden uneinheitlich auf verschiedene Standards angewendet. Die Experten plädieren für eine Vereinfachung und Harmonisierung der Vorschriften, um die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen effizienter zu gestalten. Zudem betonten sie die Notwendigkeit einer engeren Zusammenarbeit mit der Recyclingindustrie, um nachhaltigere und wirtschaftlichere Prozesse zu ermöglichen.

5.1.4. Prozesse

Die Untersuchung der E-o-L Prozesse zeigt, dass diese weitgehend den etablierten Abläufen im Bau- und Rückbausektor entsprechen und kaum von konventionellen Standards abweichen. Die Wertschöpfungskette in der E-o-L-Phase ist durch eine segmentierte Struktur geprägt, bei der jeder Prozessschritt – von der Rückbauplanung über den Materialtransport, die Materialprüfung und -aufbereitung bis hin zur Wiederverwendung oder dem Recycling – von unterschiedlichen Stakeholdern unabhängig verwaltet wird.

Aus den durchgeführten Interviews wird deutlich, dass die Prozesse einem traditionellen „Business-as-usual“-Modell folgen, bei dem Dienstleistungen sequenziell erbracht und Vermögenswerte von einem Akteur zum nächsten übertragen werden. Diese isolierte Arbeitsweise fördert ein „Silodenken“, das die Zusammenarbeit und den Informationsfluss zwischen den Beteiligten einschränkt. Der Austausch beschränkt sich auf rudimentäre Daten wie Materialart und -menge, während weiterführende Informationen über Prozesse oder Materialhistorie nicht weitergegeben werden. Dies führt zu einem fragmentierten Informationsfluss, der die ganzheitliche Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft behindert.

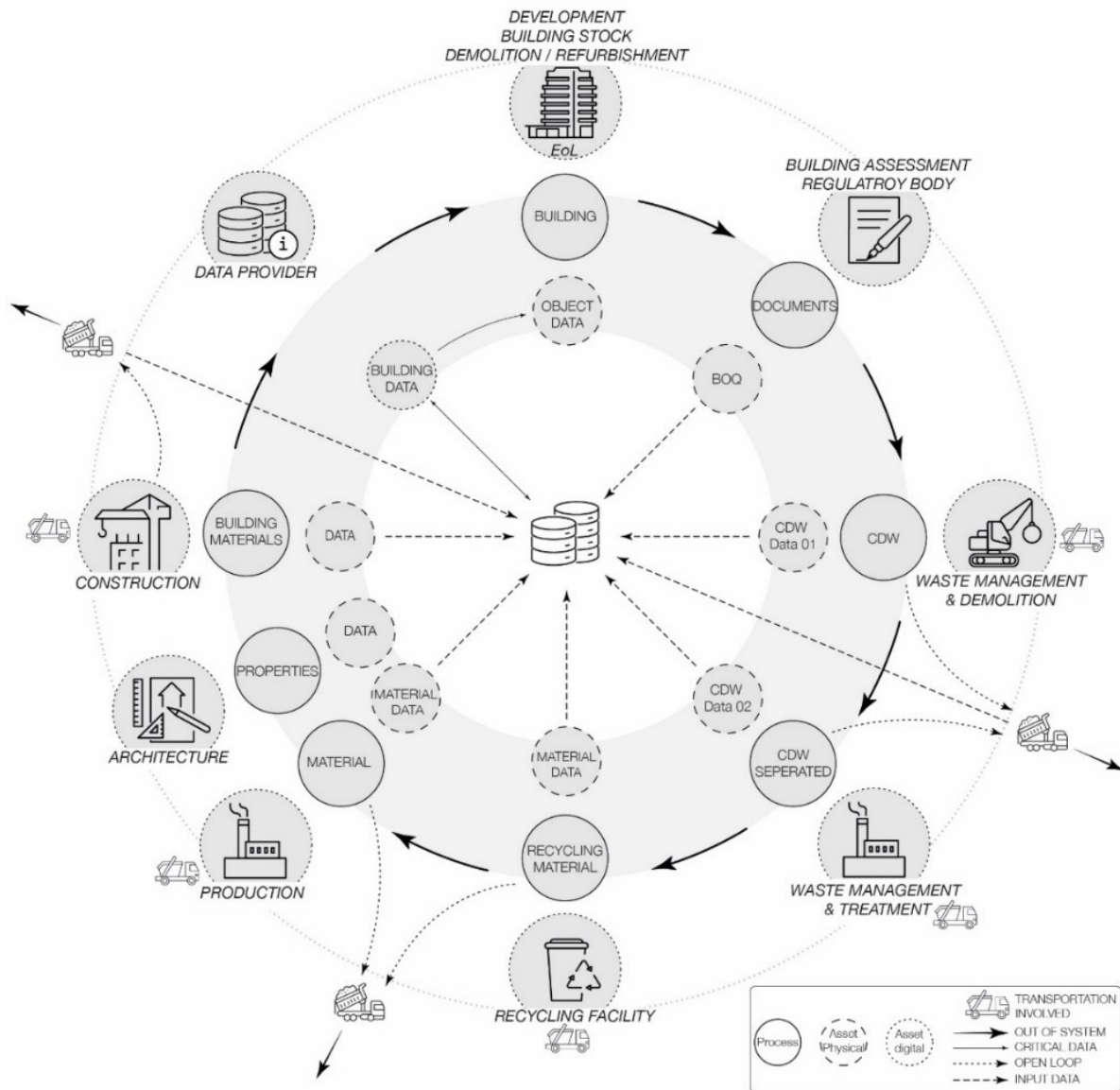
Die Interviewpartner sind sich einig, dass eine zentrale Lösung notwendig ist [Common Data Environment (CDE)], um Transparenz, Rückverfolgbarkeit und den Austausch von Informationen, Materialien und Komponenten zu verbessern. Ein einheitliches Daten- und Dokumentationsformat, das alle relevanten Informationen entlang der gesamten Wertschöpfungskette bereitstellt und speichert, wird als essenziell angesehen. Dieses Format sollte nicht nur den aktuellen Prozessschritt unterstützen, sondern auch die wiederholten Zyklen der Kreislaufwirtschaft berücksichtigen, indem es Daten für nachfolgende Durchläufe – auch für neue Stakeholder – zugänglich macht. Obwohl konkrete Lösungsvorschläge zunächst fehlten, wurde nach einer Einführung in die Möglichkeiten einer Blockchain-basierten Lösung (im Rahmen des Projekts DiCYCLE) diese Technologie von einigen Interviewpartnern als vielversprechender Ansatz betrachtet. In der anschließenden Diskussion über

¹⁸ <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20009212> (abgerufen 10.04.2025; 15:29)

¹⁹ <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20011285> (abgerufen 10.04.2025; 15:31)

mögliche Umsetzungen entstand die in Abbildung 8 dargestellte Visualisierung der Prozesse und Assets in der Kreislaufwirtschaft (vgl. Srećković et al., 2024).

Abbildung 8: Prozesse und Assets in der Kreislaufwirtschaft (Srećković et al., 2024)
 © Marijana Srećković, Dominik Hartmann, Stefan Schützenhofer, Alexandra Kotecki



5.1.5. Technologien und Daten

Derzeitige digitale Tools und Anwendungen dienen primär der Verwaltung von Daten für spezifische Aufgaben, bieten jedoch keine durchgängige Datenpflege oder -übertragung zwischen verschiedenen Stakeholdergruppen. Sie fungieren als sogenannte Insellösungen. Befragte nannten gängige Tools wie Excel, Bestandsverwaltungssysteme oder spezialisierte Software wie EDM für die Abfall- und Recyclingindustrie. Diese Ansätze führen jedoch zu niedriger Datenqualität und mangelnder

Interoperabilität, da keine einheitliche digitale Schnittstelle oder ein standardisiertes Medium für die Datenübertragung existiert. Dies beeinträchtigt den Informationsfluss erheblich.

Ein Beispiel für einen innovativen Anwendungsfall im Datenmanagement wurde im Kontext eines Abbruchprojekts beschrieben: Hier wurde ein BIM-Modell erstellt und mit Materialdaten angereichert, um quantitative und teilweise qualitative Aussagen über das Material zu ermöglichen. So konnten die Massenströme von Beton nachverfolgt werden. Der Betonschutt wurde – oft direkt vor Ort zwischengelagert, um kostenintensive Transporte zu vermeiden – für den Bau eines neuen Gebäudes wiederverwendet. Dadurch entstand ein geschlossenes Kreislaufsystem für einen Teil des Baumaterials.

Auf der Ebene von Bauelementen berichtete ein Befragter, dass wiederverwendbare Bauelemente in seinem Sortiment mit digitalen Eigenschaften und Daten für Käufer ausgestattet werden. Die Nutzung dieser Daten bleibt jedoch begrenzt, da nachfolgende Prozesse der Stakeholder nicht interoperabel sind. Für die Implementierung digitaler Eigenschaften ist eine enge Zusammenarbeit mit den Unternehmen erforderlich, um relevante Parameter zu definieren und eine Über- oder Unterausstattung der Objekte zu vermeiden. Zudem sollte regelmäßig geprüft werden, ob neue Eigenschaften, die noch nicht marktetabliert sind, wirtschaftlich und sinnvoll umsetzbar sind.

Durch solche Maßnahmen können digitale Technologien Standards für die Identifikation, Rückverfolgbarkeit und den Informationsgehalt von Bauelementen setzen, um diese in einem Kreislaufsystem zu halten.

Aktuell stehen Dokumente wie Lieferscheine, Bauabfallformulare, Erkundungsberichte zu gefährlichen Stoffen, Entsorgungsberichte und Sammelbelege im Fokus. Diese enthalten Informationen wie Datum, Uhrzeit, Ort, Materialart, Qualität und Gewicht, werden nach Abfallschlüsselnummern sortiert und meist in Standardformaten wie PDF oder Excel in internen Verwaltungsprogrammen gespeichert.

Die Interviews zeigen, dass nur wenige Daten durchgehend gepflegt und weitergegeben werden. Jeder Akteur sammelt und verwaltet Daten auf individuelle Weise, was – trotz ähnlicher Parameter – durch fehlende Schnittstellenkompatibilität den Datenfluss einschränkt.

5.1.6. Kritikpunkte

Neben den bekannten Herausforderungen in den Bereichen Prozesse, Technologie und Daten haben die Interviews weitere Hindernisse für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft (CE) in der Bauindustrie identifiziert. Diese lassen sich in kulturelle, monetäre, rechtliche, praktische und allgemeine CE-spezifische Probleme unterteilen. Der folgende Abschnitt fasst die von den Befragten genannten Hürden bei der Implementierung und Umsetzung der Kreislaufwirtschaft zusammen.

- **Mangelnde Anreize für Beteiligte**

Die Bauindustrie ist nach wie vor stark von einem linearen Wirtschaftsmodell geprägt, das die Wiederverwendung von Baumaterialien erschwert. Ein zentrales Problem ist der fehlende Anreiz für Akteure entlang der Wertschöpfungskette, recycelte oder wiederverwendete Materialien einzusetzen, da dies oft wirtschaftlich unattraktiv erscheint. Viele Verbraucher gehen zudem davon aus, dass Sekundärmaterialien günstiger sein müssen als neue Rohstoffe, was den Druck auf Bauunternehmen erhöht. Folglich ist der Abriss eines Gebäudes derzeit häufig kostengünstiger als ein kreislauforientiertes Modell. Dies liegt vor allem an einem Mangel an Informationen über den ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Mehrwert der Wiederverwendung.

Die Auseinandersetzung mit dem Lebensende von Bauelementen bleibt größtenteils theoretisch. Bisher fehlt ein praktikables Zuordnungsmodell, das Haftungs- und Identitätsfragen klärt und durch einen klaren rechtlichen Rahmen gestützt wird. Ohne solche Modelle bleibt die Motivation für Akteure

im Architektur-, Ingenieur- und Bauwesen (AEC) begrenzt, sich aktiv für Kreislaufwirtschaft einzusetzen.

- **Rechtlicher Rahmen und Sekundärmaterialien**

Wie bereits im Abschnitt zu Gesetzen, Normen und Vorschriften erläutert, bildet der rechtliche Rahmen ein komplexes Geflecht aus Richtlinien, Grenzwerten und Vorgaben. Insbesondere die Regelungen zur Wiederverwendung und Entsorgung von Baumaterialien werden zunehmend strenger und komplexer. Ein Interviewpartner nannte als Beispiel Kupferkabel mit PVC-Isolierung, die teilweise als Sondermüll eingestuft werden, obwohl moderne Recyclinganlagen das Kupfer ohne Sondermüllbehandlung gewinnen könnten. Solche Vorschriften erfordern eine schnellere Anpassung der Gesetzgebung an den Stand der Technik, um die Kreislaufwirtschaft effektiv zu fördern. Gleichzeitig mangelt es an einer konsequenten Durchsetzung und Kontrolle bestehender Gesetze, um die gewünschte Wirkung zu erzielen.

Ein wesentliches Hindernis liegt in der Gesetzgebung und Standardisierung, nicht in technischen Einschränkungen. Häufige Änderungen von Normen erschweren die Produktion in geschlossenen oder offenen Kreisläufen sowie die Neuzertifizierung von Materialien, da die Industrie mit den dynamischen Anforderungen kaum Schritt halten kann. Zu den rechtlichen Hürden zählen insbesondere Fragen des Abfallrechts, der Nutzung von Sekundärbaustoffen und die Regulierung mobiler Aufbereitungsanlagen. Im Abfallrecht ist oft unklar, wem Abfälle gehören und ab wann ein Material als Abfall gilt. Die rechtlichen Vorgaben sind komplex und auf zahlreiche Gesetzestexte verteilt, was die Umwandlung von Bauschutt in Sekundärmaterialien erschwert. Dies wird durch strenge Grenzwerte zusätzlich verstärkt.

- **Herausforderungen bei der Nutzung von Sekundärrohstoffen**

Die Verwendung von Sekundärmaterialien ist mit erheblichen Hürden verbunden, da sie nicht nur technisch, sondern vor allem wirtschaftlich tragfähig sein muss. Zu den Hindernissen gehören der hohe Aufwand für Demontage, Reinigung, Lagerung, Sicherstellung der Materialreinheit, erhöhte Transportkosten und die Umnutzung. Diese Faktoren erhöhen die Kosten eines Abrisses und damit die Gesamtkosten eines Bauprojekts. Dies wirkt sich besonders auf Investoren und den sozialen Wohnungsbau aus, da steigende Baukosten zu höheren Mieten führen können.

Aktuell ist es oft kostengünstiger, Gebäude abzureißen, als ein effektives Kreislaufmodell zu etablieren, das die Wiederverwendung von Materialien wirtschaftlich attraktiv macht. Ein weiteres Problem ist die mangelnde Rückverfolgbarkeit von Materialien, die die Wiederverwendung weniger attraktiv macht. Ohne transparente Dokumentation über Herkunft und Eigenschaften von Sekundärmaterialien bleibt die Akzeptanz in der Branche begrenzt.

→ **Fazit:** Die Interviews haben gezeigt, dass für eine erfolgreiche Umsetzung von CE und entsprechenden E-o-L-Prozessen in der AEC eine Vielzahl von Faktoren und Interessengruppen zusammenkommen müssen. Die erforderlichen Maßnahmen erfordern letztlich einen breit angelegten Ansatz, bei dem die zuvor genannten Probleme beseitigt werden. Ziel der Interviews war es daher nicht, Lösungen zu finden, sondern den aktuellen Stand zu bewerten und die in der Theorie postulierten Unterschiede und Gemeinsamkeiten zu ermitteln, um diese entweder zu verifizieren oder zu widerlegen, um sie für die Umsetzung von CE in Österreich zu nutzen.

5.1.7. Maßnahmen und Empfehlungen für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft

Die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft sowie eines effektiven End-of-Life-Managements im Bauwesen erfordert tiefgreifende technologische, rechtliche und kulturelle Veränderungen. Experten betonen die Komplexität des Systems und die Notwendigkeit struktureller Anpassungen in der Baubranche, ohne jedoch konkrete Einzellösungen zu priorisieren. Zu den zentralen Herausforderungen gehören:

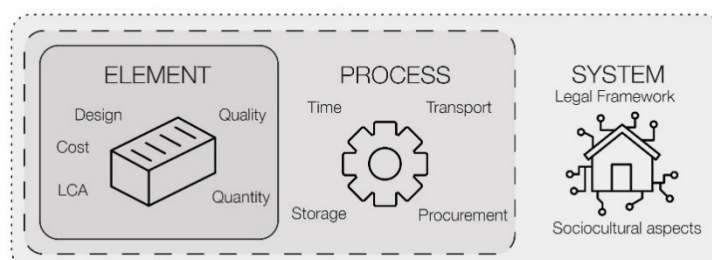
- **Kultureller Widerstand:** Die Akzeptanz von wiederverwendeten Materialien ist oft gering, was die Umsetzung der CE erschwert.
- **Wirtschaftliche Hürden:** Die Wiederverwendung von Materialien wird häufig als unrentabel wahrgenommen, insbesondere aufgrund der Präferenzen von Verbrauchern.
- **Rechtliche Komplexität:** Uneinheitliche gesetzliche Vorgaben behindern die Umwandlung von Abbruchmaterialien in Sekundärressourcen.

Maßnahmen zur Förderung der Kreislaufwirtschaft: Ein ganzheitlicher Ansatz, der strukturelle Reformen, rechtliche Harmonisierung und die Zusammenarbeit zwischen Politik, Industrie und Forschung umfasst, ist unerlässlich. Folgende Maßnahmen wurden als vielversprechend identifiziert:

1. **Rechtliche Harmonisierung:** Die Vereinheitlichung von Gesetzen auf nationaler und internationaler Ebene würde die Umsetzung der CE erleichtern. Arbeitsgruppen mit Vertretern aus Ministerien, Bauwesen, Fertigung, Abfallwirtschaft und Recycling könnten praxisnahe und einheitliche Regelungen entwickeln, die über Ländergrenzen hinweg gelten.
2. **Wiederverwendungskredit:** Ein innovatives Konzept ist die Einführung eines Systems, bei dem Materialien nicht abgeschrieben, sondern im Wert „aufgeschrieben“ werden. Dies fördert die langfristige Nutzung von Baumaterialien im Wirtschaftskreislauf.
3. **Building Information Modeling:** BIM kann als digitale Datenbank dienen, um Gebäude als Rohstoffquellen zu verwalten. Dies ermöglicht eine effiziente Planung und Wiederverwendung von Materialien, erfordert jedoch präzise Daten und Dokumentationen, insbesondere für Bestandsgebäude und As-Built-Modelle. In der Schweiz setzen einige Kantone bereits auf solche Komponentenmanagementsysteme, um datengestützte Materialwiederverwendung zu fördern.
4. **Einheitliche Standards:** Maßnahmen wie europaweit standardisierte Lebenszyklusanalysen, verpflichtende Recyclingquoten in Ausschreibungen und ein standardisierter Leistungskatalog für den geordneten Rückbau könnten die CE unterstützen. Ein solcher Katalog sollte die zusätzliche Zeit und Kosten für die Wiederverwendung von Komponenten berücksichtigen.
5. **Blockchain-Technologie:** Diese bietet Potenzial, die Transparenz und Rückverfolgbarkeit in der Wertschöpfungskette zu verbessern, sowohl für Materialien als auch für Informationen.

Abbildung 9: Drei Ebenen der CE- und E-o-L-Prozesse (Srećković et al., 2024)

© Marijana Srećković, Dominik Hartmann, Stefan Schützenhofer, Alexandra Kotecki



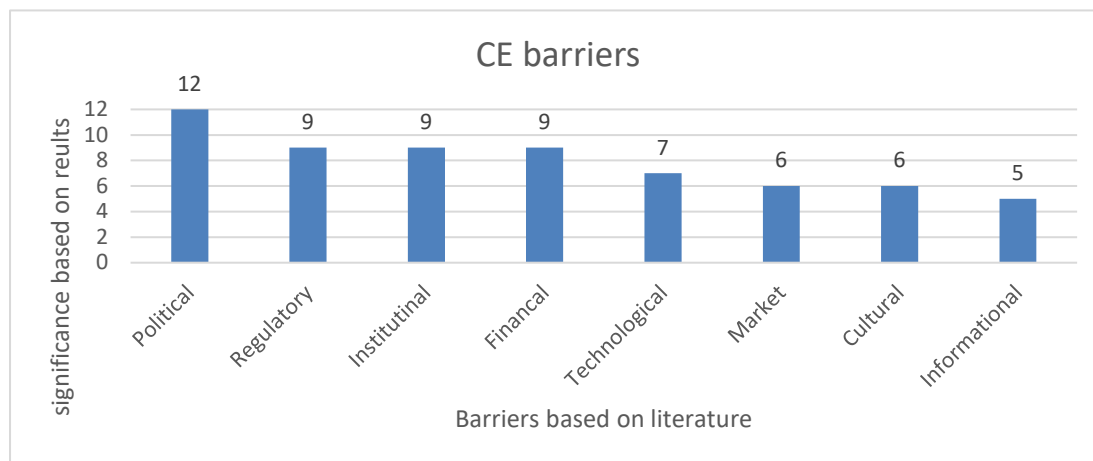
Drei Ebenen der Kreislaufwirtschaft: Die Umsetzung von CE- und E-o-L-Prozessen lässt sich in drei Ebenen unterteilen (siehe Abbildung 9):

- **Elementebene:** Einzelne Maßnahmen, wie die Einführung eines Wiederverwendungskredits, können bereits wirksam sein, ohne dass andere Ebenen vollständig angepasst sind.
- **Prozessebene:** Modifikationen von Prozessen, wie etwa durch das Forschungsprojekt DiCYCLE, sind entscheidend, um die CE schrittweise in bestehende Abläufe zu integrieren.
- **Systemebene:** Diese umfasst die anderen Ebenen und bildet den übergeordneten Rahmen für eine vollständige Transformation hin zur Kreislaufwirtschaft.

Interviews mit Experten zeigen, dass Fortschritte auf der Elementebene auch dann Wirkung entfalten können, wenn die Prozess- und Systemebenen noch nicht vollständig ausgereift sind. Dies deutet darauf hin, dass die Einführung der CE nicht von einem perfekt regulierten Gesamtsystem abhängt. Für eine nachhaltige Ablösung der linearen Wirtschaft ist jedoch ein Ansatz erforderlich, der alle drei Ebenen integriert.

Herausforderungen in Österreich: Abbildung 10 veranschaulicht die Zustimmung der Befragten in Österreich zu bekannten CE-Hindernissen. Die Situation in Österreich ähnelt der in Ländern wie Belgien, den Niederlanden, dem Vereinigten Königreich, Dänemark, Italien und Australien (Giorgi et al. 2022; Ho et al., 2023). Die Auswertung der Interviews bestätigt, dass die Komplexität der Hindernisse eine differenzierte Herangehensweise erfordert.

Abbildung 10: Diagramm zu CE-Hindernissen in Österreich (Srećković et al., 2024)
© Marijana Srećković, Dominik Hartmann, Stefan Schützenhofer, Alexandra Kotecki



Fazit: Der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft im Bauwesen erfordert einen breit angelegten Ansatz, der strukturelle, rechtliche und technologische Innovationen miteinander verknüpft. Während einzelne Maßnahmen auf Elementebene erste Erfolge erzielen können, ist für eine vollständige Transformation ein Zusammenspiel aller Ebenen notwendig. Weitere Forschung, etwa im Rahmen des Projekts DiCYCLE, wird dazu beitragen, die Prozessebene gezielt anzupassen und die Bedingungen für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu schaffen.

5.2. Use Case Analyse und CE-Hierarchie

5.2.1. CE-Hierarchie und Use Case Einordnung

In Anlehnung an ISO 59004:2024 und Potting et al. (2017) stellt Abbildung 11 alle Strategien der Circular Economy (CE) dar. Diese ermöglicht uns eine entsprechende Einordnung der erforschten Use Cases in dieser Hierarchie (Abb. 11 und Abb. 12), die nachfolgend näher erläutert werden.

Abbildung 11: CE-Hierarchie in Anlehnung an ISO 59004 und Potting et al. (2017)
© 2024 TU Wien

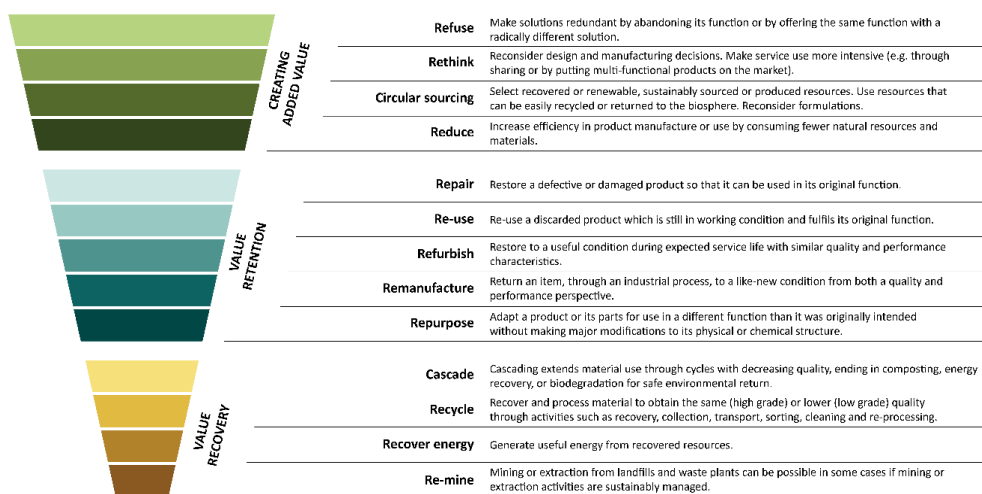
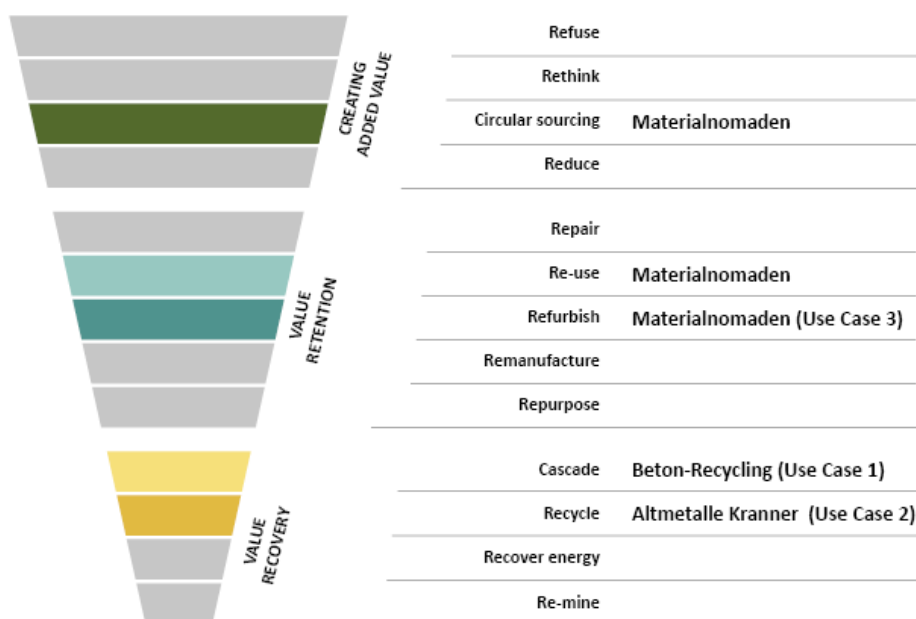


Abbildung 12: Einordnung der Use Cases in die CE-Hierarchie © 2024 TU Wien



Die CE-Hierarchie zeigt somit, welche Möglichkeiten für die Steuerung des Ressourcenverbrauchs bestehen und gibt als Leitlinie vor, je weiter oben in der Hierarchie angesiedelt desto ressourcen- und energieschonender. Die CE-Hierarchie (Abb. 11) ist in drei Bereiche unterteilt: *Value Recovery*= „Rückgewinnung“; *Value Retention*=„Erhaltung“; *Creating Added Value*=„Mehrwertschöpfung“. Dabei wurde deutlich, dass zwei Use Cases (Beton-Recycling, Altmetalle Kranner) im *Value Recovery* der CE-Hierarchie angesiedelt sind, während der dritte Use Case (Materialnomaden) im *Value Retention* liegt. Durch die Erweiterung des Betrachtungsfeldes auf die Wiederverwendung von Schwerlastschranken (Materialnomaden & Altmetalle Kranner) konnten auch Prozesse abgebildet werden die sich im oberen, wirkungsvolleren Bereich der CE-Hierarchie abspielen. Diese Zuordnung ist ein wichtiges Ergebnis des Projekts, da diese Betrachtungsweise eine präzisere Einordnung des Ressourcen- und Werterhalts, im End-of-Life der Gebäude, erlaubt.

Die Use Cases dieses Forschungsprojekts werden mit der erwähnten 3A (Actor/Activity/Asset) Methode für Prozessanalysen untersucht (s. Kapitel 4). Die Analysedarstellung ist nachfolgend in den Abbildungen 13 - 15 ersichtlich.

5.2.2. Beschreibung der Use Cases

▪ Use Case 1: Betonrecycling / Beton-Kaskadierung (Beton-Recycling-Unternehmen)

Der Recyclingprozess von Beton beginnt mit einer Bestandsaufnahme und der Ermittlung der Abbruchmassen. Ab einer Gesamtmasse von mehr als 750 Tonnen Bau- und Abbruchabfällen ist laut ÖNORM B 3151 eine "orientierende Schad- und Störstofferkundung" durch eine rückbaukundige Person durchzuführen. Ist außerdem ein Brutto-Rauminhalt des Bauwerks von mehr als 3.500 m³ gegeben, ist stattdessen eine Schad- und Störstofferkundung gemäß ÖNORM EN ISO 16000-32 durch eine externe befugte Fachperson oder Fachanstalt durchzuführen. Die Ergebnisse der Beurteilung sind, von der befugten Fachperson oder Fachanstalt, in einem Beurteilungsnachweis darzustellen.

Mit Hilfe der so ermittelten Daten kann nun eine Spezifizierung der erwartbaren Qualitäten der Baurestmassen (BRM) stattfinden und die entsprechenden Schlüsselnummern nach dem Abfallverzeichnis gemäß Österreichischer Abfallverzeichnisverordnung, zugewiesen werden. Mit Hilfe der Schlüsselnummern können Betriebe identifiziert werden die als Abnehmer für die vorhandenen BRM in Frage kommen und Verhandlungen über den Abnahmepreis geführt werden.

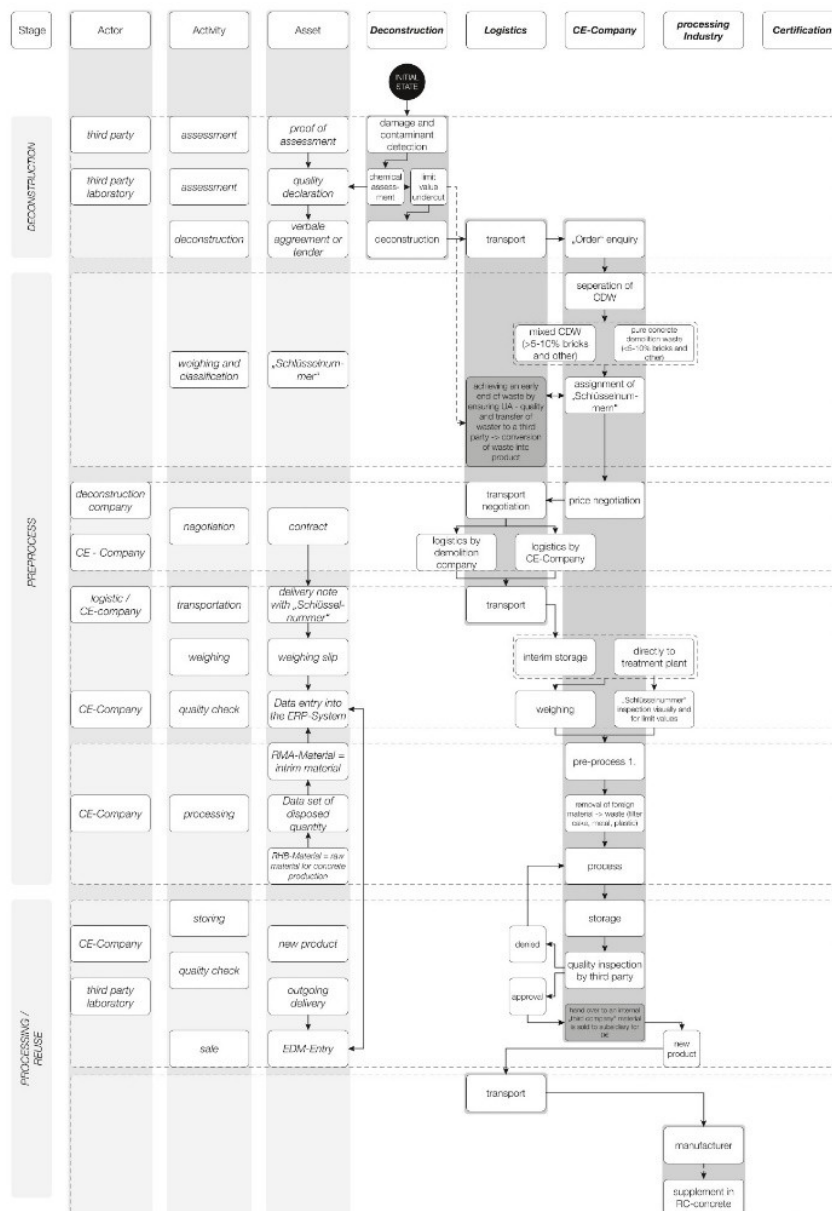
Durch die nun folgende Erteilung eines Auftrages über die Abnahme der BRM, also die Äußerung der Entsorgungsabsicht, erhalten die Baurestmassen den Abfallstatus und sind ab diesem Moment als solcher zu behandeln. Mit dem Verbringen der BRM müssen deren Schlüsselnummern und Mengen im EDM-Portal gemeldet werden. Das EDM ist ein Verbundsystem von Anwendungen welches es ermöglicht Entstehung, Behandlung und Verbleib von Abfällen, innerhalb Österreichs nachzuvollziehen und so Behörden aller Verwaltungsebenen den Vollzug einzelner Verwaltungsvorschriften ermöglicht.

Nach der Beförderung der BRM zum Beton-Recycling-Unternehmen erfolgt eine Eingangskontrolle. Entsprechen die BRM den vereinbarten Qualitäten, erfolgt die Annahme durch das CE-Unternehmen und somit die Eigentumsübertragung. Die BRM werden gewogen und kategorisiert und die so gewonnenen Daten in das Enterprise-Resource-Planing-System des CE-Unternehmens eingepflegt, was die Nachvollziehbarkeit der unternehmensinternen Rohstoffströme, ab diesem Punkt, gewährleistet.

Nach diesem Vorgang beginnt der eigentliche Verwertungsprozess. In einem ersten Schritt werden die BRM mit Hilfe eines Baggers zerkleinert und grobe Verunreinigungen entfernt. Danach erfolgt die händische Sortierung auf einer Sortierstraße, um kleinteiligere Verunreinigungen zu entfernen. In einem letzten Schritt erfolgen das Sieben und Brechen des Materials. Als Ergebnis dieser ersten Reinigungs- und Zerkleinerungsmaßnahmen erhält man rezyklierte mineralische Hochbau-Restmassen (RMH), diese können bereits in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt werden, da sie unterschiedliche Funktionen im Tiefbau erfüllen.

In einem nächsten Schritt werden die RMH durch Waschanlagen, Nasssiebung und Filterpresse weiter gereinigt. Als Nebenprodukte dieser Prozessstufe bleiben Restabfälle, mineralische Abfälle und Filterkuchen zurück, welche getrennt voneinander verwertet werden. Während die Restabfälle dem üblichen Entsorgungsweg zugeführt werden, werden die mineralischen Abfälle in der Zementindustrie stofflich und der Filterkuchen thermisch verwertet. Das Hauptprodukt des Gesamtprozesses wird als RHB-Material bezeichnet. RHB-Materialien sind Stoffe die als Roh-, Hilfs- oder Betriebsstoffe eingesetzt werden können. In diesem Fall stellt das RHB-Material, welches sich durch einen geringen Anteil an Feinteilen auszeichnet und über gewünschte Sieblinien und Korngrößen verfügt, das Ausgangsprodukt für Recyclingbeton dar, in welchem es die Zuschlagsstoffe teilweise ersetzen kann.

Abbildung 13: Darstellung der Prozesse beim Beton-Recycling © 2024 TU Wien



Zum Zwecke der Qualitätssicherung wird das RHB-Material im Qualitätssicherungslager zwischengelagert, wo es einer erneuten Untersuchung unterzogen wird. Erst nach Bestätigung der Qualität des Endproduktes wird dieses an eine interne dritte Partei weitergegeben, um das Abfallende herbeizuführen. Im EDM erfolgt nun eine Bilanzierung über den Verbleib der verwerteten Materialien und der durch Kaskadierung dem Wirtschaftskreislauf erneut zur Verfügung stehenden Rohstoffe. Das RHB-Material und die darin gebundenen Primärrohstoffe stehen nun, sowohl dem CE-Unternehmen als auch anderen Wirtschaftsteilnehmern, erneut als Zuschlagsstoff für Recyclingbeton zur Verfügung.

▪ **Use Case 2: Altmittel_Recycling (Altmittel Kranner)**

Der Recyclingprozess von Armaturen beginnt mit der Demontage und Lagerung vor Ort. Im günstigsten Fall wird an dieser Stelle bereits eine erste Sortierung der Metallteile vorgenommen, was den Transport vereinfacht und den weiteren Aufwand verringert. Den Transport zum Aufbereitungsunternehmen (CE-Unternehmen) übernimmt bei kleineren Mengen häufig das

Abbruchunternehmen selbst. Eine Abholung durch das CE-Unternehmen ist ebenso möglich. Nach Ankunft am Wertstoffhof wird die Gesamtmasse des angelieferten Materials ermittelt, auf einem ersten Wiegeschein festgehalten und im unternehmensinternen Warenwirtschaftssystem erfasst.

Größere und schwerere Teile müssen nach dem Abladen mittels eines Baggers mit Greifer vorsortiert werden. Bei den hier betrachteten Armaturen ist dieser Schritt nicht notwendig. Für die anschließende, händische Feinsortierung kommen einfache Hilfsmittel wie Besen und Schaufel zum Einsatz, sowie Magnete, die die Unterscheidung zwischen Eisen- und Nichteisenmetallen vereinfachen.

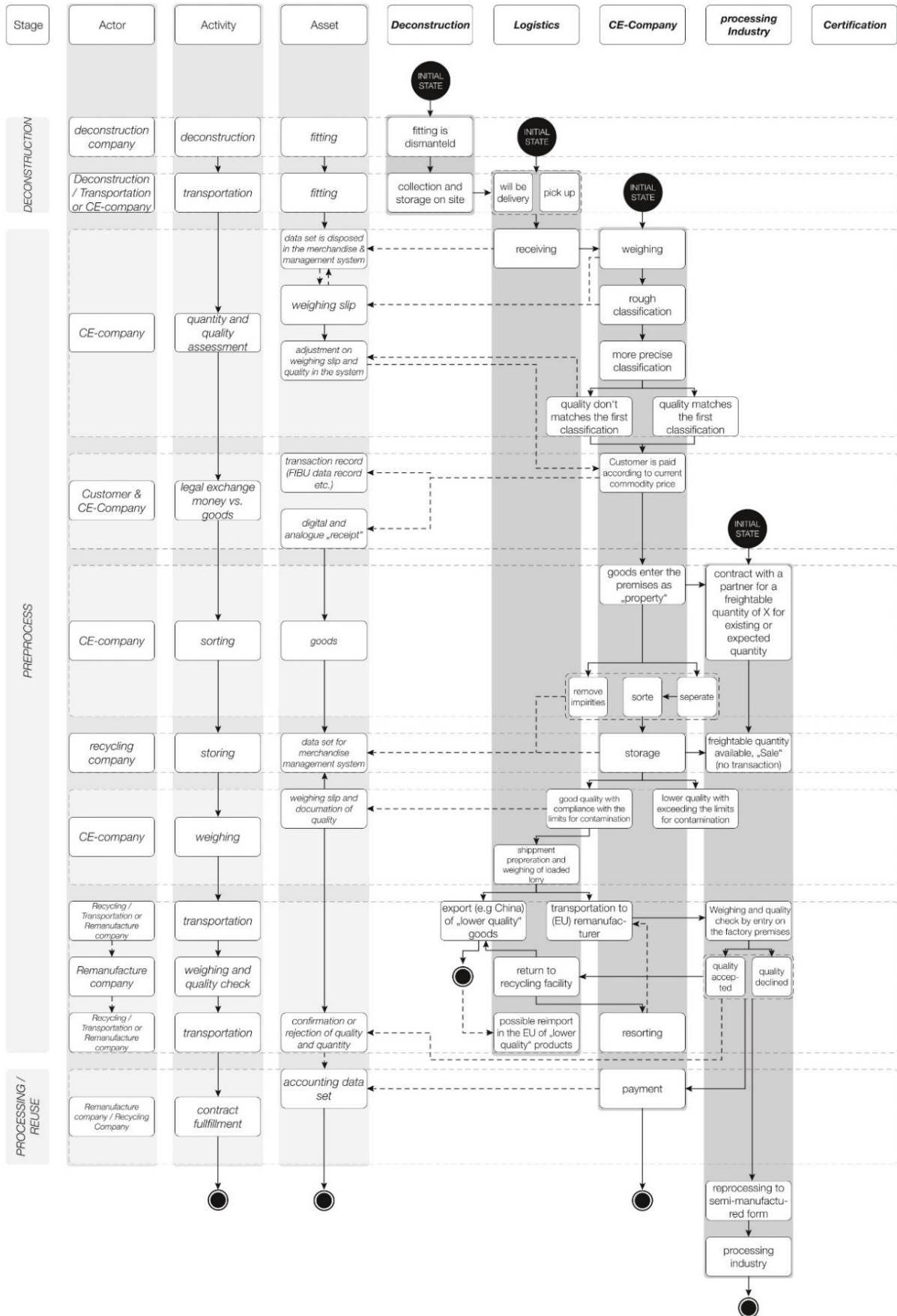
Am Ende des Sortierprozesses werden die unterschiedlichen Metalllegierungen voneinander getrennt verwahrt. Auch nichtmetallische Wertstoffe, wie Holz, Elektroschrott und Kunststoffe liegen zu diesem Zeitpunkt getrennt voneinander vor. Diese werden, abhängig von ihrer Qualität, entsorgt oder zum Zwecke der Kreislaufführung an entsprechende Unternehmen weitergegeben. Es erfolgt ein zweiter Wiegevorgang, der es ermöglicht die Massen der Wertstoffe separat zu ermitteln und auf einem zweiten Wiegeschein zu dokumentieren. Die so ermittelten Daten dienen als Basis zur Ermittlung des Ankaufspreises für die entgegengenommenen Wertstoffe, welche mit dem Ankauf der Wertstoffe den Besitz des CE-Unternehmens übergehen.

In weiterer Folge werden die Wertstoffe gelagert, bis eine frachtfähige Quantität vorliegt. Im Rahmen der Versandvorbereitung werden die metallischen Wertstoffe, abhängig vom Reinheitsgrad, zwei Qualitätsstufen zugeordnet. Die höhere Qualitätsstufe besteht aus Materialien die innereuropäischen Qualitätsanforderungen entsprechen. Die niedrigere Qualitätsstufe, deren Reinheit nicht den europäischen Anforderungen entspricht, ist für den Export ins außereuropäische Ausland bestimmt.

Werden Altmetalle an europäische Eisen- und Stahlerzeuger (Recyclingunternehmen) weitergegeben, erfolgt abnehmerseitig eine erneute Qualitätskontrolle. Genügen die Wertstoffe nicht den Qualitätsanforderungen kommt es zur Zurückweisung der Lieferung oder es muss erneut sortiert werden, bis die gewünschte Reinheit erreicht ist. Werden die Wertstoffe angenommen erfolgt die Bezahlung des CE-Unternehmens in Abhängigkeit von Quantität, Qualität und Art des gelieferten Materials.

Die nun im Besitz des Recyclingunternehmens befindlichen Metalle, werden nach ihrer Sortierung gelagert um anschließend zerkleinert, gereinigt und eingeschmolzen zu werden. Auf diesem Weg entstehen, in Abhängigkeit von der Rohstoff- und Prozessqualität, Sekundärrohstoffe unterschiedlicher Qualität, die dem Wertschöpfungsnetzwerk erneut zur Verfügung stehen.

Abbildung 14: Darstellung der Prozesse in der Altmetallaufbereitung © 2024 TU Wien



▪ Use Case 3: Parkett-Refurbishment (Materialnomaden)

Parkettböden, die rückgebaut werden, werden in den meisten Fällen der thermischen Verwertung zugeführt. Die enthaltenen Ressourcen, hauptsächlich Holz, gehen somit verloren und das im Holz gebundene CO₂ wird freigesetzt. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft ist es aber ebenso möglich, Parkett nach dem Rückbau erneut zu verwenden, und so Ressourcen, Umwelt und Klima zu schonen. Der zugrundeliegende Prozess, der Wiederherstellung eines brauchbaren Zustands mit ähnlichen Qualitäts- und Leistungsmerkmalen wird als Refurbishment bezeichnet, was in etwa mit Überholung übersetzt werden kann.

Der Prozess des Refurbishments von Parkett beginnt im Regelfall mit der Kontaktaufnahme des Eigentümers mit dem CE-Unternehmen (Materialnomaden), welches einen kotenlosen Abbau und Abtransport anbietet. Dem Eigentümer entstehen, anders als im Falle der Entsorgung, keine Kosten. Es folgt eine Begutachtung durch einen Sachverständigen, um Qualität und Quantität des Parketts zu beurteilen, dabei werden die gewonnenen Informationen in Formblättern erfasst. Die gesammelten Daten werden anschließend in eine zentrale Datenbank (Harvest Map) übertragen. Diese erfasst sämtliche registrierten Böden, unabhängig davon, ob sie bereits demontiert oder noch verbaut sind. Hierbei ist es essenziell, den Unterschied zwischen der ursprünglich erfassten und der tatsächlich demontierten bzw. verwertbaren Menge zu dokumentieren.

Anhand der ermittelten Daten wird nun die Entscheidung getroffen, ob der Boden, ausgebaut und zu einem Reuse-Produkt verarbeitet oder entsorgt wird.

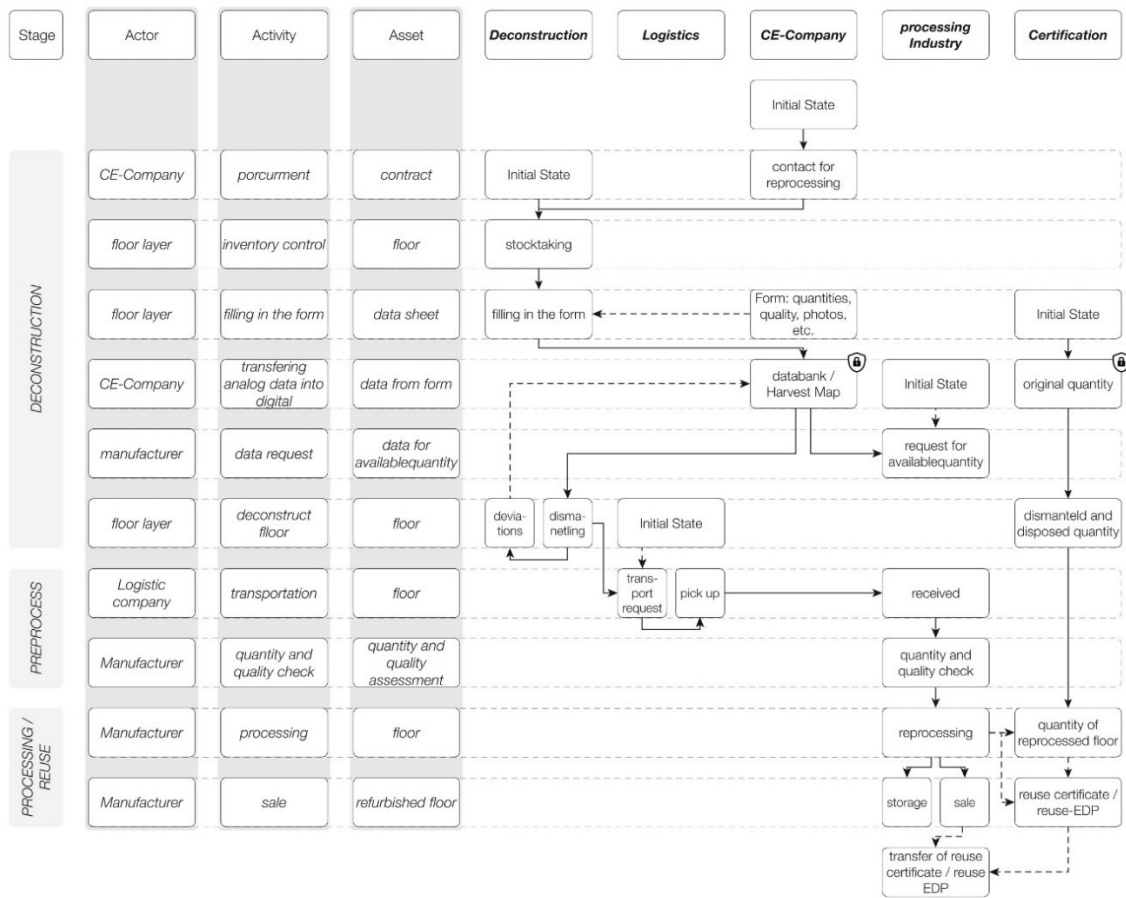
Die digitalisierten Informationen zur Verfügbarkeit von gebrauchten Parkettböden werden anschließend an den Refurbisher des Parketts übermittelt. Dieser nutzt die Daten, um sein Enterprise Resource Planning (ERP)-System mit den relevanten Mengenangaben zu versorgen. Das ERP-System ermöglicht es, die aktuelle Nachfrage nach dem Wiederverwendungsprodukt „ReParkett“ mit den vorhandenen Mengen an gebrauchtem Parkett abzugleichen. Basierend auf diesen Daten plant das Vertriebsteam des Herstellers die erforderlichen Mengen sowie Verkaufsaktivitäten und legt somit fest, wie viel „Rohmaterial“ für die Herstellung neuer Parkettböden benötigt wird.

Abhängig von den Entscheidungen aus der vorherigen Phase wird in bestehenden Gebäuden entweder eine Demontage des Bodens eingeleitet oder das bereits gelagerte Parkett an den Refurbisher geliefert. Je nach Art des Projekts erfolgt im Rahmen der Demontage eine „Just-in-Time“-Lieferung an den Refurbisher oder das Material wird zunächst beim CE-Unternehmen zwischengelagert.

Nach der Demontage wird der Boden von einem Logistikunternehmen zum Refurbisher transportiert. Dort wird die Qualität und Quantität des angelieferten Materials überprüft, um sicherzustellen, dass es den zuvor dokumentierten Angaben entspricht. Im Anschluss beginnt der Aufbereitungsprozess des Parketts. Dabei wird das Material im zu „ReParkett“ aufbereitet, welches die für eine erneute Verlegung notwendigen Eigenschaften aufweist.

In Abhängigkeit von den vorherigen Verkaufsplanungen und den vorhandenen Produktionskapazitäten wird das fertige Parkett entweder beim Refurbisher zwischengelagert oder direkt an den Kunden verkauft. Mit dem folgenden, erneuten Einbau wird der Lebenszyklus des Parketts deutlich verlängert, ein Großteil der Ressourcen erhalten und der Materialkreislauf geschlossen.

Abbildung 15: Darstellung der Prozesse – Parkett Refurbishment © 2024 TU Wien



5.3. System Dynamics Modellierung der Use Cases

Die untersuchten Wertschöpfungsketten der Use Cases sind die Grundlage für die Erstellung der SD-Modelle. Hier wurden sämtliche relevanten Prozessschritte, Einflussfaktoren und Entscheidungspunkte explizit aufgenommen und im Modell berücksichtigt, wodurch eine umfassende und systematische Erfassung der Prozesse gewährleistet wird. Durch diese methodische Vorgehensweise konnten die Prozesse der End of Life-Phase im Bauwesen in ihrer Komplexität ganzheitlich, transparent und reproduzierbar dargestellt und analysiert werden.

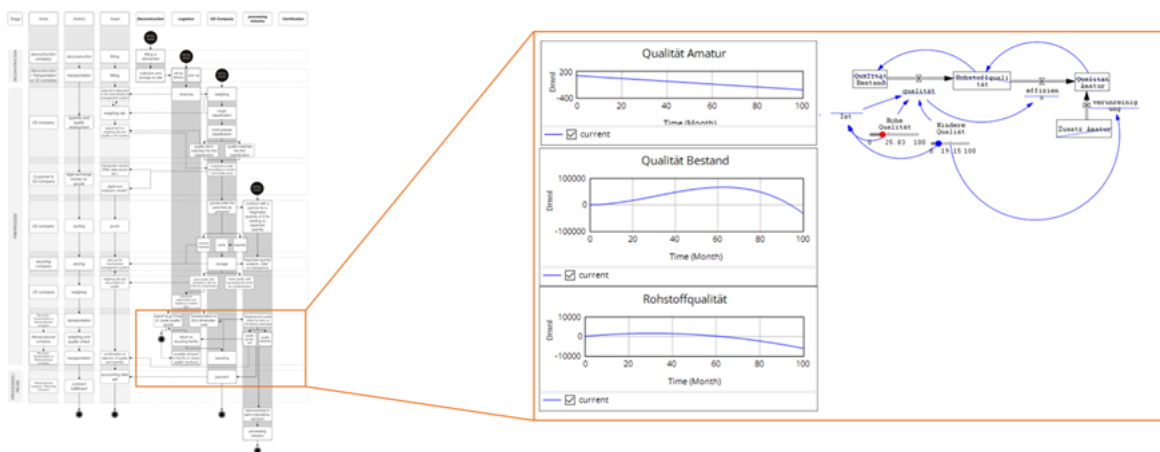
5.3.1. Beispielhafte SD-Modellierung – Almetalle Kranner (Use Case 2):

Die Untersuchung des Use Case Almetalle Kranner wurde durch ein zusätzliches Interview mit dem Geschäftsführer des Unternehmens vertieft. Im Fokus steht der Prozessabschnitt, in dem Material – hier Metalle minderer Qualität oder spezifischer Zusammensetzung – das Kreislaufsystem verlässt und nicht mehr Teil eines Closed-Loop der Kreislaufwirtschaft (CE) ist. Ziel war es, die Auswirkungen auf die CE zu analysieren, wenn Materialien, die eigentlich im Cradle-to-Cradle-System zirkulieren, den Kreislauf verlassen und später in verändertem Verarbeitungszustand zurückkehren.

Wie bereits in der Prozessbeschreibung des Use Case (vgl. Abb. 14) dargestellt, werden Metalle, die die EU-Grenzwerte für Recycling nicht erfüllen, ins Nicht-EU-Ausland exportiert und verlassen somit das europäische Kreislaufsystem. Dort werden sie weiterverarbeitet oder recycelt, oft mit neuem oder

anderem Recyclingmaterial vermischt. Da im Ausland geringere Anforderungen an Materialzusammensetzung und -qualität gelten als in der EU, verändert sich die Qualität der resultierenden Produkte. Diese Produkte – etwa Armaturen – werden teilweise wieder in die EU importiert und gelangen so zurück in den europäischen Markt. Obwohl sie metallurgisch nicht den EU-Standards entsprechen, sind sie aufgrund ihres niedrigeren Preises wettbewerbsfähig, etwa in Baumärkten. Dadurch etablieren sich Produkte minderer Qualität im Markt, die nach ihrem Lebenszyklus erneut dem Recyclingprozess zugeführt werden – ein Mechanismus, der die Gesamtqualität im System langfristig beeinträchtigt.

Abbildung 16: Verortung Einzelprozess im Gesamtprozess © 2024 TU Wien



Das System Dynamics (SD)-Modell (vgl. Abb. 16) bildet diesen Prozess vereinfacht ab, indem es Absatzmargen und weitere Einflussfaktoren ausklammert, um den grundlegenden Recyclingmechanismus zu analysieren. Die Qualität von Produkten wie Armaturen auf dem europäischen Markt hängt maßgeblich vom Verhältnis zwischen EU-produzierten und importierten Produkten ab. Szenarienanalysen zeigen folgende Ergebnisse:

1. Mittlere EU-Qualität und durchschnittliche Importqualität: Die Gesamtqualität verschlechtert sich langfristig, da die Rohstoffqualität kontinuierlich abnimmt.
2. Hohe EU-Qualität bei minimalen minderwertigen Importen: Die Gesamtqualität verbessert sich nachhaltig.
3. Hochwertige Importe ohne EU-Qualitätsstandards: Die Qualität sinkt stark, da das System an Stabilität verliert.

Ein kritisches Verhältnis von 41 % Nicht-EU-Produkten zu 59 % EU-Produkten genügt bereits, um die Systemqualität spürbar zu beeinträchtigen. Verschärfte EU-Grenzwerte können die Qualität kurzfristig steigern, doch Verzögerungseffekte durch den hohen Bestand minderwertiger Produkte führen mittelfristig wieder zu einem Rückgang (vgl. Abb. 17).

Das SD-Modell visualisiert diese Dynamiken anschaulich und bestätigt die Einschätzungen von Branchenexperten wissenschaftlich fundiert. Es dient als Entscheidungsgrundlage für politische und wirtschaftliche Maßnahmen. So zeigt ein Beispiel, dass ein Preiszuschlag von 9 % auf minderwertige Produkte deren Absatzmarkt reduziert und die Qualität im System stabilisiert, indem hochwertige Produkte durch Verdrängungseffekte gefördert werden (vgl. Abb. 18).

Abbildung 17: Einzelner Prozessschritt und Auswirkungen variabler Größen auf die Simulation
 © 2024 TU Wien

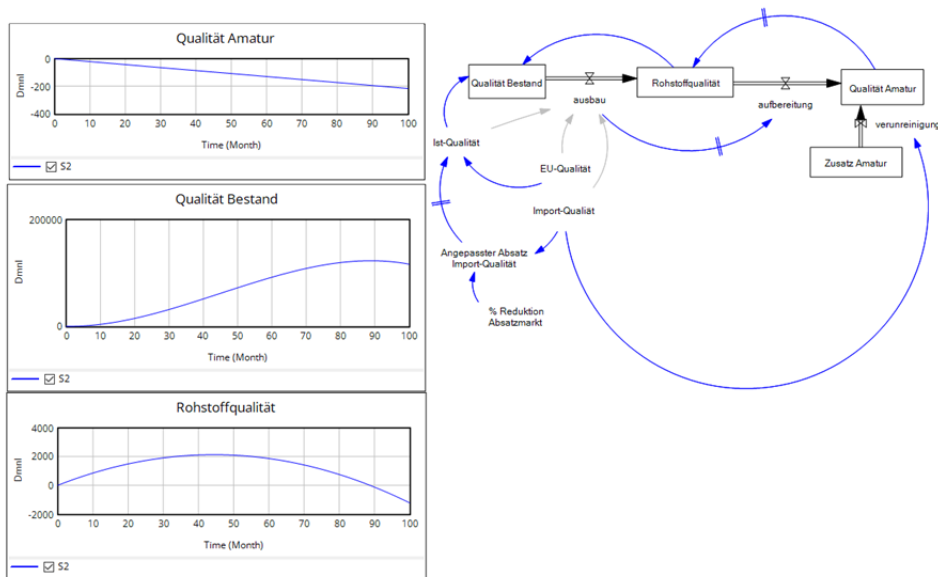
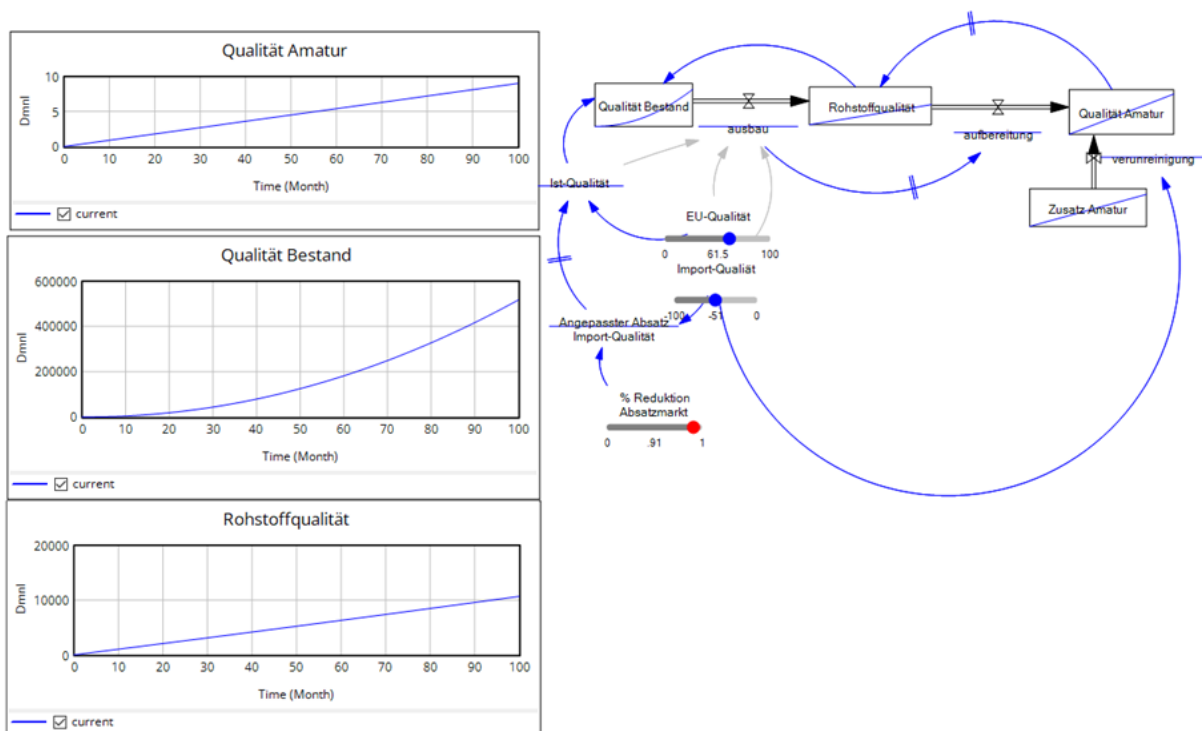


Abbildung 18: Geänderte Variablen und geändertes Ergebnis der Simulation, Stock-and-Flow-Darstellung © 2024 TU Wien



- Langfristige Dynamiken und systemische Ansätze

Die Untersuchung verdeutlicht die Notwendigkeit, langfristige Dynamiken und systemische Zusammenhänge in der Kreislaufwirtschaft, insbesondere im Bauwesen, zu berücksichtigen. Kurzfristige Verbesserungen können ohne kontinuierliches Monitoring und dynamische Anpassung

mittelfristig unwirksam bleiben. Besonders Rückkopplungseffekte, die zeitversetzt und nicht-linear wirken, wurden bisher oft unterschätzt. Prozesse, bei denen Materialien das System verlassen und wieder eingeführt werden, haben langfristige Auswirkungen, die ohne qualitative und quantitative Analysen nicht erfasst werden können.

Das Modell ermöglicht somit die Simulation verschiedener Szenarien und zeigt, dass regulatorische Maßnahmen entscheidend zur Stabilisierung der Gesamtqualität beitragen. Es unterstreicht die Bedeutung einer kontinuierlichen systemischen Überwachung und Anpassung, um die Ziele der Kreislaufwirtschaft nachhaltig zu erreichen. Die transparente Darstellung komplexer Zusammenhänge schafft eine fundierte Grundlage für Entscheidungen, etwa durch die Integration zusätzlicher Variablen wie anpassbare Grenzwerte, um gezielte Maßnahmen zu simulieren.

5.3.2. Beispielhafte SD-Modellierung - Materialnomaden (Use Case 3):

Die Abbildung 19 verdeutlicht die Zoom-Stufe für diese Analyse. Erkennbar ist dabei, dass diese im Vergleich zu dem zuvor analysierten „Kranter“ Prozess eine Ebene höher gesetzt ist, da nicht ein Prozessschritt, sondern ein Gesamtprozess des Parkett-Kreislaufs der Materialnomaden betrachtet wurde. Die Materialfluss-Modellierung entwickelte sich schrittweise von einer grundlegenden Stock-and-Flow-Darstellung und einem Causal-Loop Diagramm (CLD) (Abb. 19) zu einem umfassenden Lebenszyklus- und Businessdynamik-Modell (Abb. 20). Zu Beginn wurden empirisch basierte Parameter wie verfügbare Materialmenge, Eignungsanteil für Reuse oder Recycling und Verwertungsquoten (Refurbish, Reuse, Waste) identifiziert und visualisiert. Anschließend erfolgte eine Erweiterung durch wirtschaftliche Einflussfaktoren mittels eines Causal-Loop-Diagramms, das Faktoren wie Produktattraktivität, Materialzugänglichkeit, Produktions- und Arbeitskosten sowie Prozess-Effizienzen exemplarisch berücksichtigt hat, um dynamische Prozess-Zusammenhänge darzustellen. Im finalen integralen Modell von CLD und Stock and Flow, wird der vollständige Lebenszyklus eines Elements (Parkett) dargestellt, beginnend bei der Erfassung und Inventarisierung vorhandener Ressourcen über Rückbauprozesse und Materialbearbeitung bis zur Wiedereinbringung in den Kreislauf oder Entsorgung.

Abbildung 19: Stock-and-Flow-Darstellung und Casual-Loop Diagramm zu ReParkett
© 2024 TU Wien

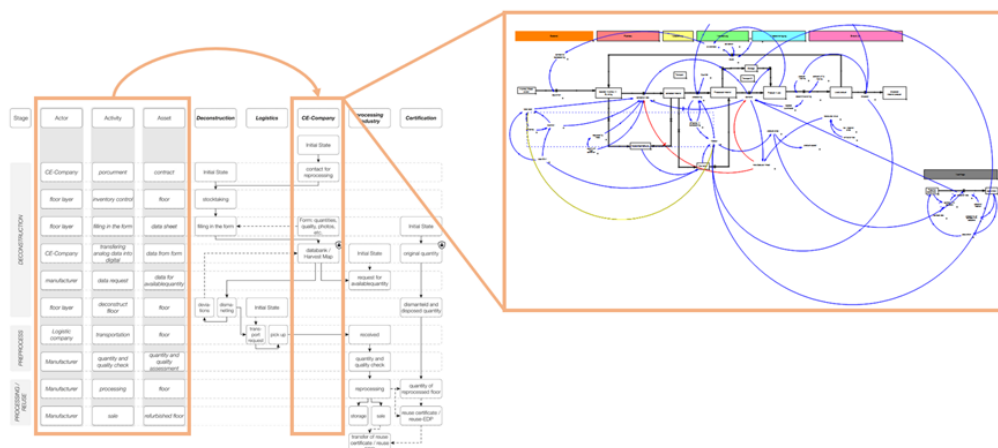
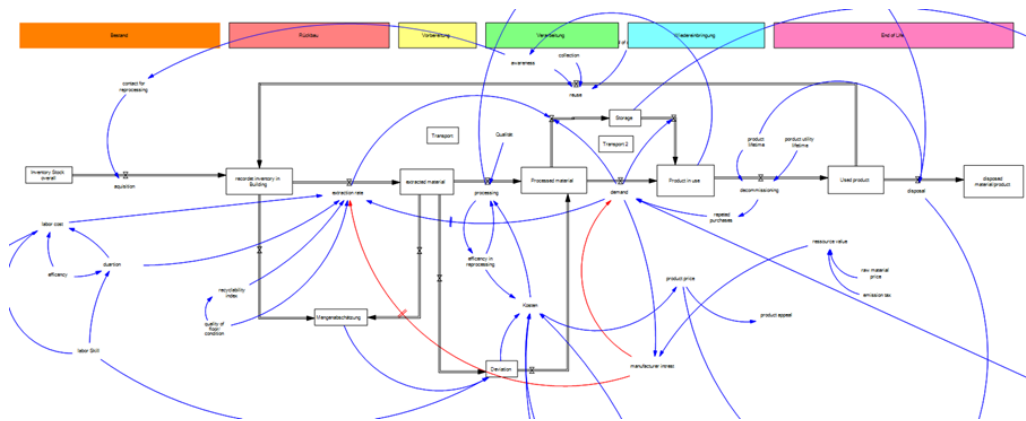


Abbildung 20: Lebenszyklus- und Businessdynamik-Modell © 2024 TU Wien



5.3.3. Gesamtprozessmodellierung

Im Rahmen einer prototypischen Auswertung des CE-Gesamtprozesses (s. Abb. 21 und 22) wurde eine Kriterienmatrix erarbeitet, um Prozesse und Geschäftsmodelle hinsichtlich ihrer Eignung für die Kreislaufwirtschaft zu evaluieren und entsprechend anzupassen. Dafür sind folgende Kriterien relevant: **Zielsetzung, Effizienz, Input und Output der Prozesse, Anzahl und Komplexität der Schritte, Anzahl der Stakeholder und deren Rollendefinitionen, bestehende Abhängigkeiten, eingesetzte Technologien sowie deren Zweck und Schnittstellen, zeitlicher Aufwand, Engpässe oder Verzögerungen, methodische Bewertung und Qualitätskontrolle, erforderlicher Aufwand und Ressourcenbereitstellung, potenzielle Risiken sowie relevante Gesetze und Vorschriften.** Zudem sind **Skalierbarkeit und Flexibilität** entscheidend, um langfristige Anpassungen und Optimierungen zu ermöglichen. Zusätzlich gelten für Materialien Kriterien in vier wesentlichen Stadien, die es zu evaluieren gilt: Qualität und Funktionalität im *eingebauten, ausgebauten, nach der Aufbereitung* und im „neuen“ *wieder-eingebautem Zustand*.

Generell gilt für den Gesamtprozess als Ergebnis, dass sich digitale Lösungen, insbesondere BIM, Blockchain und interoperable Plattformen im End-of-Life Prozess von Gebäuden aktuell nur bedingt einsetzen lassen. Zentrale Erkenntnisse über Probleme, die es zu lösen gilt, für eine erfolgreiche Implementierung sind folgende:

- Fehlende Standardisierung und Interoperabilität
Aktuell existieren für die E-o-L-Phase kaum einheitliche Vorgehensweisen oder Datenaustauschformate. Obwohl BIM etabliert ist, fehlt es an entsprechenden IFC-Erweiterungen und Prozessen, die den Rückbau abbilden. Dies führt oft zu Datensilos und Unterbrechungen in der Informationskette: Gebäude werden zwar digital geplant, aber bei Abriss oder Rückbau liegen relevante Daten (z. B. Materialqualität, Einbauhistorie) nicht vor.
- Eine systematische „IFC End of Life Class“ würde Abhilfe schaffen, sodass Informationen zu wiederverwendbaren Komponenten, Schadstoffen oder Rückbauempfehlungen verlustfrei an die Demontagefirmen übergehen.
- Digitalisierung als Hebel für transparente Kreislaufprozesse
Bereits vorhandene Technologien – etwa RFID-Tags an Bauteilen, IoT-Tracking während des Transports und Blockchain-Lösungen für Herkunftsnachweise – können dazu beitragen, dass Baumaterialien nicht einfach verschwinden und in der Menge untergehen. Werden Bauteile eindeutig gekennzeichnet und digital verwaltet, ist ihr Verbleib nachvollziehbar. Damit steigt

das Vertrauen im Markt für Sekundärbaustoffe, und hochwertige Komponenten bleiben erhalten.

- Barrieren durch mangelnde Prozess-Formalität

Jeder Abriss wird aktuell sehr individuell geplant und es gibt wenig standardisierte E-o-L-Workflows. Dieses „Projekt für Projekt denken“ erschwert eine durchgängige digitale Abbildung. Empfohlen wird daher, Rückbau-Planung zu formalisieren – z. B. stets mit einer digitalen Bauteil-Auditierung zu beginnen und auf einheitliche Datenstrukturen zu setzen. Nur so lassen sich Tools wie 3D-Scans, E-o-L-Datenbanken oder BIM-gestützter Rückbau langfristig, effektiv und nützlich in der gesamten Branche für den Rückbau verknüpfen und etablieren.

- Nutzen digitaler Plattformen und Marktplätze

Ein zentraler Punkt ist es, unterschiedliche Stakeholder (Architekten, Rückbauunternehmen, Hersteller, etc.) auf einer gemeinsamen Plattform zu vernetzen. Dort könnten potenzielle Käufer frühzeitig sehen, wann und wo beispielsweise Fenster, Türen oder Träger verfügbar werden. Zugleich ermöglicht dies eine effiziente Logistik: Durch Echtzeit-Information lassen sich Transporte und Lagerflächen vorausschauend planen. Die Analysen zeigen: Wo solche digitalen Marktplätze bereits aktiv sind, steigt die Anzahl wiederverwendbarer Bauteile deutlich. Dabei ist aber lediglich die Existenz von Marktplätzen nicht ausreichend, diese muss durch ein dynamisches und frühzeitiges Angebot von Bauteilen oder Materialien attraktiv für alle Stakeholder gemacht werden. Dadurch könne Materialien sowohl eine Wertsteigerung im eingebauten Zustand erfahren, als auch bei einer frühzeitigen Bekanntgabe von Rückbau, diese in eine aktuelle Planung eines anderen Projekts integriert werden. Somit kann ein bidirektionaler, dynamischer Marktplatz geschaffen werden, der sowohl ein frühzeitiges Angebot als auch eine frühzeitige Nachfrage ermöglichen kann und somit die Wiederverwendung von Materialien und Bauteilen als fixer Bestandteil in der Ausführungsplanung der Herstellungsphase integriert werden kann. Hierfür benötigt es einen Daten-Standard für Geometrie, Materialinformationen, Zustands- als auch Rückbauvariablen sowie Datenangaben für Objekte, welche ohne existierendes Angebot, damit nachgefragt werden können. Es muss somit ein Bauteil und Material Klassifizierungs- und Daten System verfügbar sein, welches, im Vergleich zu den digitalen Produktpässen (DPP), individuell für Bauteile erstellt bzw. zur Verfügung gestellt werden kann, jedoch Standardisierte Informationen enthält, sodass Material und Bauteile systematisch erfasst und in Planung und Ausführung integriert werden können.

- Blockchain und Smart Contracts als Ergänzung

Neben der Datenhaltung in BIM kann durch Blockchain Missbrauch und Manipulation (z. B. bei Herkunftsangaben) verhindern und zugleich Anreizsysteme (z. B. „Token-Belohnung“ für Recycling) etabliert werden. Beispiele zeigen, dass sich Smart Contracts einsetzen lassen, um Zahlungsvorgänge oder Pfandmodelle bei Rückgabe von Bauteilen automatisiert abzuwickeln. So kann sich ein funktionsfähiges Circular-Business-Netzwerk etablieren und gestützt durch BC gesichert werden.

Die Aktualität der Gebäudedaten ist dabei essenziell. Ein „as-built“-BIM-Modell, muss dabei über ein „In-Use-Modell“ hin zu einem „E-o-L-Modell“ geführt werden, da die Datenqualität entscheidend ist, um mit ausreichender Granularität präzise Angaben zu Materialeigenschaften, Schadstoffen und Verbindungstechniken, Bauteile als auch der Zustand der Materialien inklusive aller Veränderungen über den Lebenszyklus zu treffen, um diese der Wieder- bzw. Weiterverwendung zuzuführen. Dabei ist essenziell, dass in der kompletten Prozesskette von der Planung mit Rückbauoptionen bis zum

finalen E-o-L ein durchgängiger Datenfluss besteht. Deshalb müssen alle beteiligten Stakeholder ein Interesse oder eine Verpflichtung haben diesen Prozess mit Informationen anzureichern. Digitalisierung allein genügt dabei nicht, Unternehmen müssen bereit sein, Daten zu pflegen und mit anderen zu teilen. Dabei kann Blockchain als transparentes, aber auch privates Austauschformat dienen.

Damit Kreislaufwirtschaft im Bauwesen gelingt, ist ein durchgängiger digitaler Workflow vom „Cradle to Grave und zurück zu Cradle“ essenziell. Dafür braucht es formalisierte End of Life-Prozesse in BIM und dezentralen Plattformen in Kombination mit Interoperablen Datenaustauschformaten (u. a. Erweiterung der IFC-Standards). Zusätzlich müssen tatsächliche Anreize für Wiederverwendung (z. B. steuerliche Vorteile, Pfandsysteme, verpflichtende Materialpässe) eingeführt werden und eine Frühzeitige Einbindung von Rückbau- und Wiederverwendungsprinzipien und Konzepten bereits in der Entwurfsphase forciert werden.

Abbildung 21: Exemplarischer CE-Prozess © 2024 TU Wien

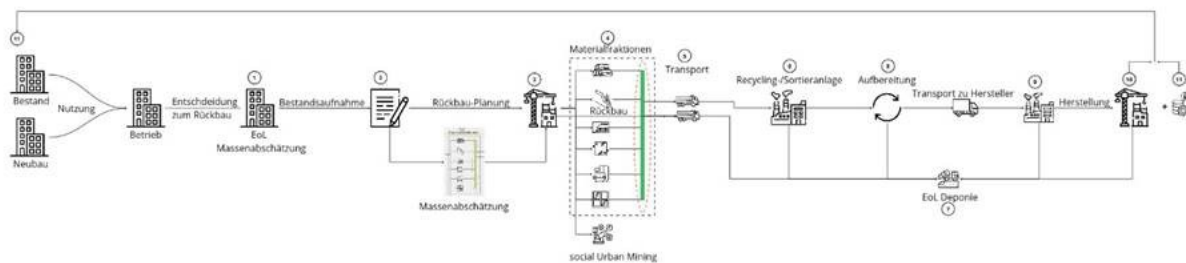
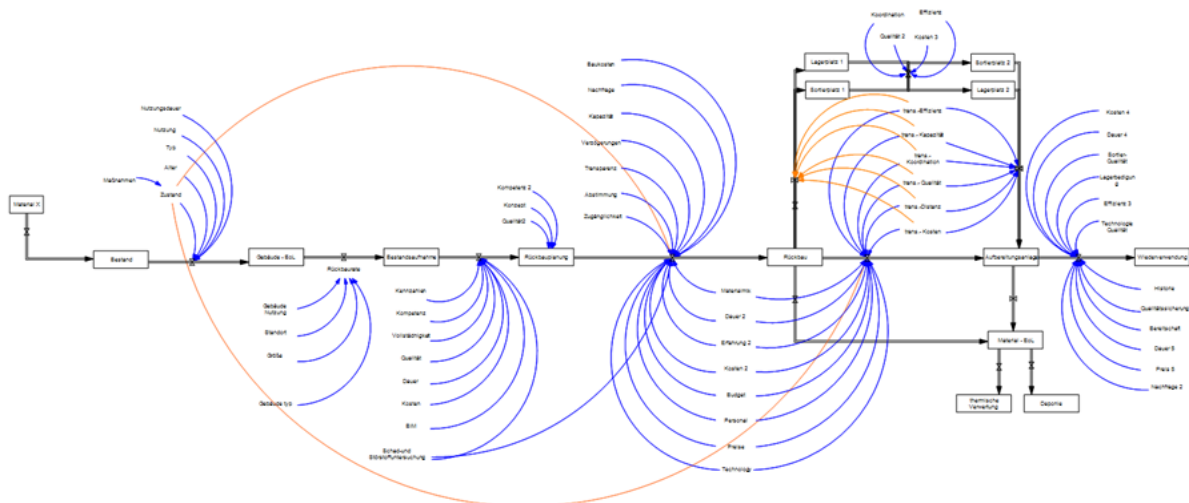


Abbildung 22: Stock-and-Flow-Darstellung CE-Prozesses © 2024 TU Wien



5.3.4. Zentrale Mechanismen, Einflussgrößen und Erkenntnisse aus der SD Modellierung

Materialien sind zunächst im Bauwerk gebunden und werden erst durch den Rückbauprozess für ein Reuse oder Recycling erschlossen. Eine frühzeitige Kontaktaufnahme mit Bestandshaltern,

Verarbeitern und Wiederverwertern ermöglicht jedoch eine vorherige Inventarisierung der Materialien (Urban Mining). Dabei ist entscheidend, welche Komponenten in welcher Form und Detailtiefe erfasst werden, um sie für die spätere Nutzung kalkulierbar zu machen und in der Planung zu berücksichtigen. Die dokumentierte Inventarisierung bildet die Basis für eine systematische Steuerung des Materialflusses.

Die Materialbewertung und die Extraktionsrate sind weitere zentrale Faktoren. Die Menge wiedergewinnbarer Materialien / Elemente hängt von der Qualität der Baustoffe, den Arbeitskosten und der Effizienz des Rückbauprozesses ab. Eine präzise Mengenabschätzung ist essenziell für wirtschaftliche Entscheidungen. Digitale Werkzeuge und datenbasierte Methoden verbessern die Erfassung von Materialqualität, -menge und -wert. Dadurch kann der Rückbau gezielt und ressourcenschonend geplant werden.

Die Effizienz des Rückbauprozesses bestimmt die Wirtschaftlichkeit der Kreislaufwirtschaft. Optimierte Prozesse senken Kosten und erhöhen die Attraktivität wiederverwendeter Baustoffe. Die Nachfrage nach Sekundärmaterialien hängt jedoch von wirtschaftlichen Anreizen, gesetzlichen Rahmenbedingungen oder Subventionen ab. Logistik und Lagerhaltung sind potenzielle Engpässe. Effiziente Verteilstrategien und ein Netzwerk aus Materialdaten und Marktbeobachtung ermöglichen eine präzise Anpassung an die Nachfrage. Durch schrittweise Integration von Kreislaufwirtschaftsprozessen in bestehende Abläufe kann ein wirtschaftliches Potenzial geschaffen werden, das den Übergang ohne Ungleichgewichte fördert.

5.3.5. Zusammenfassung der Analyse des Geschäftsprozesses und Systemvariablen

Die Bewertung der Effizienz und Wirkung eines Modells zur Ressourcenverwertung im Bauwesen erfolgt anhand spezifischer Key Performance Indicators (KPIs) und Systemvariablen. Diese Kennzahlen ermöglichen eine quantitative und qualitative Analyse der Prozesse und dienen als Basis für Optimierungsmaßnahmen, die auf die Kreislaufwirtschaft im Allgemeinen angewendet werden können. Die relevanten KPIs lassen sich in drei Hauptkategorien unterteilen:

- Produktionskennzahlen, die den Rückbau- und Recyclingprozess bewerten, darunter das Produktionsvolumen wiederverwendeter Materialien, die Durchlaufzeit von der Demontage bis zur Wiedereinbringung, die Produktionskosten, Logistikaufwand und Kosten sowie die Conversion-Rate, die den Anteil der erfolgreich weitergenutzten Baustoffe misst.
- Markt- und Kostenkennzahlen, die den wirtschaftlichen Erfolg bestimmen. Dazu zählen die Markteinführungszeit, die Geschwindigkeit der Wiedereinbringung, die Bruttomarge, also die Differenz zwischen Verkaufspreis und Aufbereitungskosten, sowie mögliche Produktionsausfälle durch qualitative oder logistische Probleme.
- Kundenbezogene Kennzahlen, die den Marktzugang für recycelte Baustoffe betreffen. Hierzu gehören die Customer Acquisition Cost (CAC), die die Kosten für die Gewinnung neuer Kunden misst, und der Customer Lifetime Value (CLV), der den wirtschaftlichen Wert langfristiger Kundenbeziehungen beschreibt.

Beispiele der KPI im Kontext Kreislaufwirtschaft:

- **Materialeffizienz:** Anteil wiederverwendeter Materialien.
- **Rückbaukosten:** Kosten pro Tonne abgebautem Material.
- **Extraktionsrate:** Menge nutzbarer Materialien aus dem Rückbau.

Neben den KPIs zu Geschäftsprozessen beeinflussen verschiedene Systemvariablen die Funktionsweise des Systems. Diese lassen sich in fünf Hauptbereiche unterteilen:

- Bauliche Faktoren wie der Gebäudezustand und die Größe, die Menge und Qualität rückbaufähiger Materialien bestimmen, sowie der Standort, der durch Transportkosten und Recycling-Infrastruktur die Wirtschaftlichkeit beeinflusst.
- Markt- und Umweltfaktoren, darunter die Marktnachfrage nach nachhaltigen Baustoffen und gesetzliche Umweltauflagen sowie Recyclingprozesse.
- Logistik und Infrastruktur, insbesondere Transportkosten, Lagerkapazität und digitale Planungs- und Verwaltungssysteme welche eine transparente und dokumentierte Materialverwertung und Nachverfolgung ermöglichen.
- Technologische Einflüsse, etwa Materialverfügbarkeit, Konstruktionsmethoden und Digitalisierung von Beständen, um den Wiederverwendungsprozess zu beschleunigen.
- Soziale und regulatorische Aspekte, darunter die gesetzliche Lage und soziale Akzeptanz recycelter Baustoffe. Hier beeinflussen Vorschriften und Anreize die Bereitschaft von Bauherren und Architekten, solche Materialien einzusetzen.

5.3.6. Neue Erkenntnisse und Mehrwert der systemdynamischen Herangehensweise

Die SD-Modellierung zeigt, dass die Wiederverwendung von Baumaterialien weit über eine reine Materialflussfrage hinausgeht. Im Gegensatz zu früheren Forschungen, die sich auf isolierte Faktoren wie Recyclingquoten oder Rückbaukosten konzentrierten, bietet dieses Modell eine ganzheitliche Perspektive. Es integriert physische Materialflüsse, wirtschaftliche Anreize und politische Rahmenbedingungen und verdeutlicht, dass die Wiederverwendung maßgeblich von systemischen Wechselwirkungen entlang der Wertschöpfungskette abhängt.

Ein zentrales Ergebnis ist, dass eine steigende Nachfrage nach recycelten Baustoffen allein nicht ausreicht, um die Wiederverwendungsrate zu erhöhen. Logistische, regulatorische und wirtschaftliche Engpässe müssen beseitigt werden, etwa durch effizientere Rückbauprozesse, verbesserte Lagerkapazitäten und Fördermechanismen für Sekundärmaterialien.

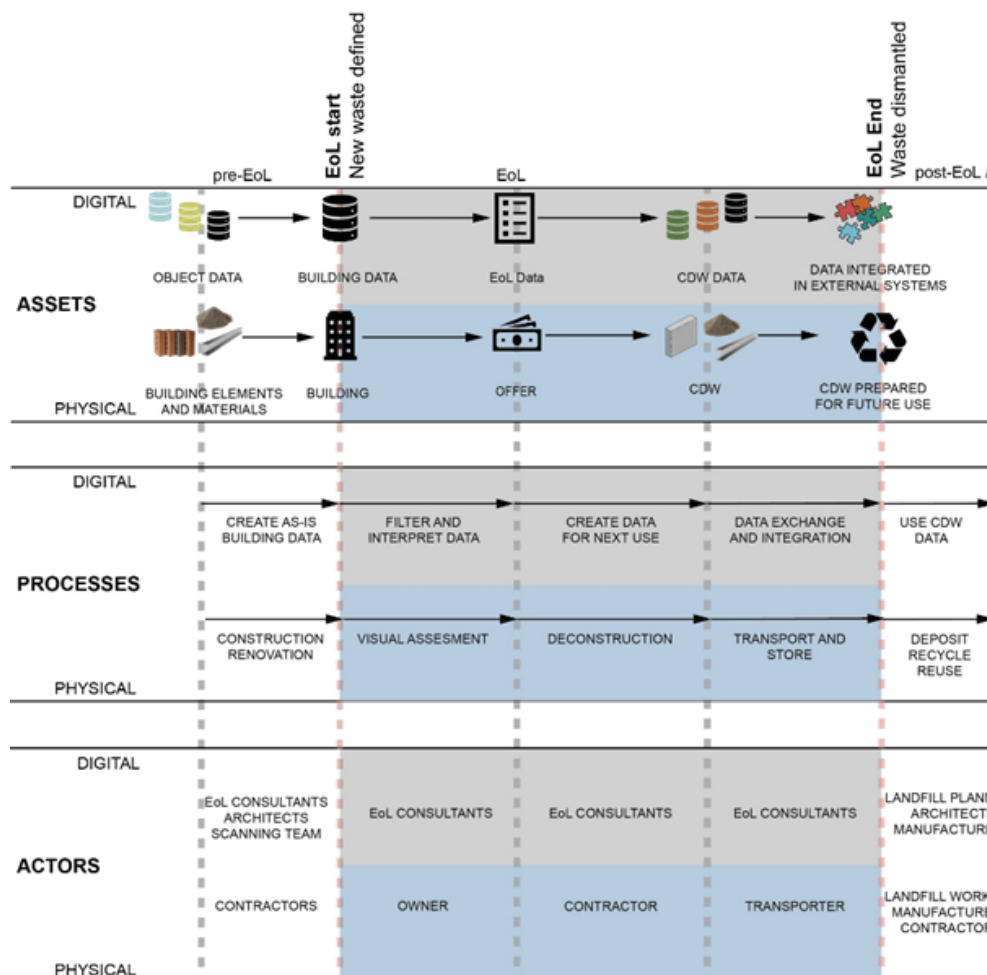
Wirtschaftliche Anreize wie steigende Rohstoffpreise, CO₂-Bepreisung oder steuerliche Vorteile für wiederverwendete Materialien können die Kreislaufwirtschaft langfristig fördern, wobei zeitliche Verzögerungen zu beachten sind. Zudem beeinflussen oft unterschätzte Faktoren wie Lager- und Transportlogistik den Erfolg von Kreislaufstrategien erheblich. Fehlende Kapazitäten oder hohe Transportkosten führen dazu, dass wiederverwendbare Materialien ungenutzt bleiben oder entsorgt werden.

Die Implementierung einer erfolgreichen Kreislaufwirtschaft erfordert eine tiefgehende Betrachtung des Systems, da viele bisherige Herausforderungen aus systemischen Denkfehlern resultieren. Ein zentrales Problem ist dabei die Vernachlässigung von Langzeiteffekten, wodurch kurzfristige Maßnahmen oft falsch interpretiert werden, insbesondere wenn Peaks als dauerhafte Verbesserungen angesehen werden. Dies führt häufig dazu, dass Verzögerungseffekte (Delays) nicht berücksichtigt werden, wodurch dynamische Anpassungen erschwert werden. Hierfür kann eine Rückblickanalyse notwendig und aufschlussreich sein, um Pfadabhängigkeiten (Path-Dependence) aufzudecken und somit gezielt gegen das fragmentierte Silodenken innerhalb bestehender Wertschöpfungsketten vorzugehen. Die Trennung der Säulen der Nachhaltigkeit (Ökonomie, Ökologie und Soziales) hemmt bisher die Umsetzung effektiver CE-Maßnahmen, da Teile allein nicht das Ganze eines resilienten Systems ergeben können. Wenn das Systemverhalten verfolgt und gemessen werden kann, gestützt durch Wirkungsgraphen für die Kreislaufwirtschaft, können konkurrierende Prozesse harmonisiert

oder Synergien gefunden werden, als auch generische Substrukturen innerhalb von CE-Systemen erkannt werden, um regulatorische Hemmnisse und Prozess sowie Handlungsweisen proaktiv und dynamisch zu adressieren. Insbesondere eine Hotspot-Analyse zur Identifikation relevanter Handlungsfelder ist dabei ausschlaggebend, jedoch besteht dabei das Risiko den Fokus falsch zu setzen. Daher ist eine kontinuierliche dynamische Anpassung entscheidend, welche auf transparenten und präzisen Vorgabe-, Zustands- und Zwischengrößen beruht, um die unzureichende Transparenz sowie Unschärfen frühzeitig zu adressieren bzw. zu erkennen.

5.4. Digitales Framework und Verknüpfung zur Datenintegration und BIM

Abbildung 23: Framework zu Struktur und Abfolge der E-o-L-Phase im Bauwesen (Sibenik et al., 2022b) © 2022 Goran Sibenik, Stefan Schützenhofer, Marijana Srećković



Das in Abbildung 23 dargestellte Framework beschreibt die Struktur und Abfolge der E-o-L-Phase im Bauwesen, aufgeschlüsselt nach physischen und digitalen Vermögenswerten („Assets“). Es verknüpft diese Assets entlang der Wertschöpfungskette, sodass physische und digitale Prozesse synchron oder nahezu gleichzeitig ablaufen. Eine zentrale Voraussetzung für die digitale Unterstützung der E-o-L-

Phase ist ein aktuelles „As-Is“-BIM-Modell, das entweder durch kontinuierliche Dokumentation früherer Projektphasen oder durch gezielte Bestandsaufnahmen für die E-o-L-Phase erstellt wird.

Das Framework gliedert die E-o-L-Phase in mehrere Ebenen, auf denen physische und digitale Assets zeitlich und organisatorisch abgestimmt werden. Physische Assets umfassen Baumaterialien und Baukomponenten, während digitale Assets die zugehörigen Daten wie Materialqualität, Herkunft, Menge und spezifische Eigenschaften repräsentieren. Diese parallele Erfassung bildet die Grundlage für eine effiziente digitale Prozessunterstützung.

Zu Beginn der digitalen Prozesskette steht die Erstellung des „As-Is“-BIM-Modells, das als unverzichtbare Basis für alle nachfolgenden Schritte dient. Es enthält essenzielle Informationen, die den gesamten E-o-L-Prozess strukturieren. Parallel dazu starten physische Aktivitäten wie Renovierungsarbeiten oder Bestandsaufnahmen. Traditionell erfolgt die Bestandsaufnahme durch visuelle Inspektionen, um die künftige Nutzung von Bau- und Abbruchabfällen [Construction and Demolition Waste (CDW)] zu bestimmen.

Im Anschluss folgt die physische Demontage von Baumaterialien und -komponenten, wodurch CDW als physische Assets entstehen. Diese werden abtransportiert und, falls nötig, zwischengelagert. Gleichzeitig werden digitale Assets generiert, die Informationen über die Bestandteile des CDW enthalten. Diese Daten werden in externe Systeme übertragen und dokumentiert, um eine lückenlose Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten.

Ein entscheidender Schritt ist die Transformation von CDW in hochwertiges Recyclingmaterial. Hierbei müssen physische Materialien mit ihren digitalen Informationen verknüpft werden, um die Identifizierbarkeit der recycelten oder wiederverwendeten Materialien sicherzustellen. Die nahtlose Datenübertragung zwischen den Prozessschritten ist essenziell, um die Konsistenz und Qualität der Informationen zu gewährleisten und den Materialwert entlang des Lebenszyklus nachvollziehbar zu machen.

Am Ende des Prozesses werden alle gesammelten digitalen Daten in das neu errichtete Gebäude oder Endprodukt integriert. Dafür ist eine zentrale Datenbank erforderlich, die Materialzu- und -abflüsse transparent speichert und pflegt, um Rückverfolgbarkeit und hohe Datenqualität zu sichern.

Die Stakeholder im Framework sind vielfältig, aber klar definiert. Digitale Assets werden häufig von spezialisierten Scanning-Teams erzeugt, während physische Prozesse vor allem Bau- und Abbruchunternehmen sowie Logistikdienstleister involvieren. Insgesamt zeigt das Framework, wie die Verknüpfung digitaler und physischer Prozesse ein integriertes Modell ermöglicht, das Silodenken überwindet und erhebliches Potenzial für Innovationen und nachhaltige Fortschritte in der Kreislaufwirtschaft bietet. Voraussetzung dafür ist ein tiefes Verständnis der beteiligten Akteure und ihrer Vernetzung, sodass Datenintegration und -austausch über alle Phasen und Stakeholder hinweg ein zentrales Element bilden.

Aus dem Zusammenspiel von physischem und digitalem Framework sowie Top-Down- und Bottom-Up-Ansätzen ergeben sich drei miteinander verknüpfte Betrachtungsebenen der Kreislaufwirtschaft: Mikro-, Meso- und Makro-Ebene. Diese wurden im Projekt methodisch genutzt, um die E-o-L-Daten und -Prozesse ganzheitlich darzustellen und zu analysieren.

Die **Mikro-Ebene** fokussiert einzelne Bauelemente und -komponenten als konkrete Bestandteile der E-o-L-Prozesse. Sie bildet die Grundlage für alle Kreislaufaktivitäten, da hier entschieden wird, ob ein Element erhalten, aufbereitet oder recycelt wird. BIM-Daten und spezifische Materialinformationen ermöglichen eine präzise Dokumentation jedes Bauteils über seinen gesamten Lebenszyklus.

Die **Meso-Ebene** umfasst systematische Prozesse wie Materialerfassung, Qualitätsprüfung, Rückbauplanung, Transportlogistik und Materialverwertung. Diese Prozesse verarbeiten die Elemente der Mikro-Ebene und verknüpfen physische mit digitalen Assets. Besonders die digitale Infrastruktur

zwischen den Prozessschritten ist entscheidend, da sie leicht in den Hintergrund geraten kann, jedoch für eine transparente und effiziente Wertschöpfungskette unerlässlich ist.

Die **Makro-Ebene** betrachtet das Gesamtsystem der Kreislaufwirtschaft und umfasst übergeordnete Rahmenbedingungen wie regulatorische Vorgaben, finanzielle Anreize und gesellschaftliche Trends. Sie definiert die Bedingungen für die unteren Ebenen und bietet eine ganzheitliche Perspektive auf die Systemintegration sowie die langfristige Entwicklung der E-o-L-Prozesse im Bauwesen.

Die Kombination von Top-Down- und Bottom-Up-Ansätzen stellt sicher, dass sowohl regulatorische Rahmenbedingungen (Makro-Ebene) als auch operative Anforderungen (Meso- und Micro-Ebene) berücksichtigt werden. Der Top-Down-Ansatz adressiert übergeordnete Vorgaben und Trends, während der Bottom-Up-Ansatz spezifische Gegebenheiten und Potenziale einzelner Geschäftsmodelle oder Technologien einbezieht. So werden Prozesse und Geschäftsmodelle in ihren Wechselwirkungen – sowohl systemweit als auch unternehmensintern – analysiert. Auf dieser Basis wurden die Use-Cases mithilfe von System Dynamics sowie einer systematischen Analyse der rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen untersucht (s. auch 5.3).

5.5. Rückschlüsse von E-o-L auf Planungsphase

Der verwertungsorientierte Rückbau ist Gegenstand einer Rückbauplanung, die den Bestand mittels BIM (Building Information Model) analysiert: Das Rückbaukonzept ermittelt Materialströme und Rückbauphasen, um Konzepte der Wiederverwendung von Bauteilen, der Verwertbarkeit von Materialien und der planerischen Überlagerung des Rückbaus mit dem anschließenden Bauvorhaben zu ermöglichen. Der Abgleich der Massenströme gestattet eine Reduktion der Entsorgung, des Zukaufs von Schüttgut und deren Transporte. Dies wird anhand des Use Case Ferry Dusika Stadion Wien dargestellt und analysiert.

5.5.1. Massenbilanz Rückbau am Beispiel Ferry Dusika Stadion Wien

Aus den Use-Cases digitaler E-o-L, die im Zuge von DiCYCLE untersucht wurden, wurde nach Freigabe der Stadt Wien der Prozess des Rückbaus des Ferry Dusika Stadions (Abb. 24 & 25) und dessen erfolgreiche Überlagerung mit dem Bauvorhaben der *Sportarena Wien* (SAWI) in die Evaluierung des digitalen E-o-L in DiCYCLE eingebracht. Grund für die Auswahl dieses Use Case unter einer Vielzahl von zur Diskussion gestellten Projekten war die durchgängige digitale Begleitung von:

- ✓ abbruchvorbereitenden Rückbauarbeiten (durch BauKarussell),
- ✓ einer ingenieurmäßig äußerst anspruchsvollen Rückbauplanung der vorgespannten Konstruktion durch drei Statikbüros gleichzeitig, auf Grundlage des E-o-L-BIM,
- ✓ der aufwendigen Re-Use Konzeption in Ausschreibung und Vergabe,
- ✓ einem äußerst hohen Grad an Verwertung von 95 % der Rückbaumaterialien,
- ✓ umfassende Daten zu Energieverbräuchen im verwertungsorientierten Rückbau,
- ✓ der Vergabebegleitung des Neubaus in Bezug auf Recyclinganteile und Klinkerreduktion im Beton

Abbildung 24: 3D-Modell Ferry Dusika Stadion
© 2021 Romm ZT

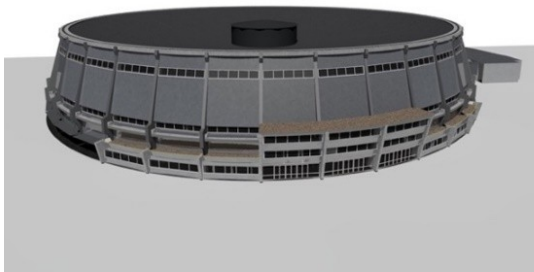


Abbildung 25: Foto Ferry Dusika Stadion
© Viennaphotographer - Own work, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=70516271>



- **Wertstoffanalyse Ferry Dusika Stadion**

Im Zuge des Rückbaus des Ferry Dusika Stadions wurde eine umfassende Analyse der metallischen Wertstoffe vorgenommen. Das Ziel dieser Fallstudie war es, Benchmarks für die Wertdichte von nicht im BIM abbildbaren Gebäudekomponenten zu etablieren und die ökonomische Nachhaltigkeit des Recyclingprozesses zu bewerten. Besonders hervorzuheben ist der Zeitraum von Juni bis September 2021, in dem die Wertstoffpreise, die bekanntermaßen starken Schwankungen unterliegen, für die Berechnung der Erlöse herangezogen wurden.

Methodik: Die Analyse basierte auf Lieferscheinlisten unseres Projektpartners Altmetalle Kranner, die genauen Mengen und Erlöse der recycelten Metalle aufzeichneten. Diese Informationen wurden auf die Bruttogrundfläche (BGF) des Ferry Dusika Stadions von 13.560 m² bezogen, um eine Vergleichbarkeit mit anderen Projekten zu gewährleisten und verlässliche Benchmarks zu schaffen.

Im Rahmen des verwertungsorientierten Rückbaues sind folgende Materialmengen, die aus dem BIM-Modell ermittelt wurden, zu fassen bzw. aufzubereiten und zu verwerten (Tabelle 1).

Tabelle 1: Mengen Abbruchmaterial lt. BIM

Abbruchmaterial	m ³	t	Umrechnungsfaktor
Stahlbeton	19.000,00 m ³	47.500,00 t	2,5
Ziegel	293,00 m ³	586,00 t	2
Gipskarton	112,00 m ³	38,08 t	0,34
Stahl	125,00 m ³	975,00 t	7,8
Buntmetalle	39,00 m ³	105,30 t	2,7
EPS	112,00 m ³	3,36 t	0,03
XPS	390,00 m ³	15,60 t	0,04
Mineralwolle	705,00 m ³	21,15 t	0,03
Summe:	21.000,00 m³	50.000,00 t	

- **Ergebnis und Wirkung**

Mit insgesamt 75 % Verwertung in der Gesamtheit von Rückbau- und vorbereitenden Aushubarbeiten übertrifft das Projekt alle selbst gesetzten Ziel der Stadt Wien zur Kreislaufwirtschaft und kann als Best Practice gelten: Von 122.000 t Gesamtaufkommen (Rückbau und Aushub) wurden insgesamt 90.000 t Material verwertet oder wiederverwendet (Tabelle 2).

Der verwertungsorientierte Rückbau schlägt dabei mit einer Verwertungsquote von 95 % der abgebrochenen mineralischen Baurestmassen zu Buche: 50.000 t Baurestmassen aus dem Rückbau konnten durch eine mobile Brech- und Siebanlage zu 95 % auf der Baustelle aufbereitet und als Sekundärrohstoff mit der Fraktion 0/32 in die Verwertung gebracht werden.

Tabelle 2: Gesamte Massenströme

Bewegtes Material	m³	t	Faktor
Stahlbeton	19.000,00 m ³	47.500,00 t	2,5
Ziegel	293,00 m ³	586,00 t	2
Gipskarton	112,00 m ³	38,08 t	0,34
Stahl	125,00 m ³	975,00 t	7,8
Buntmetalle	39,00 m ³	105,30 t	2,7
EPS	112,00 m ³	3,36 t	0,03
XPS	390,00 m ³	15,60 t	0,04
Mineralwolle	705,00 m ³	21,15 t	0,03
Zwischensumme:	21.000,00 m³	50.000,00 t	
Aushubmaterial weggefahren	25.000,00 m ³	45.000,00 t	1,8
Umgelagert und eingebaut	6.550,00 m ³	12.000,00 t	1,8
Wiederverfüllung der Böschung (vor Ort Gelagert)	8.000,00 m ³	15.000,00 t	1,8
Zwischensumme:	39.550,00 m³	72.000,00 t	
Gesamtsumme:	60.550,00 m³	122.000,00 t	

Von den 72.000 Tonnen Aushubmaterial wurden 12.000 Tonnen für die Herstellung des Geländes verwendet, 15.000 Tonnen für die spätere Verfüllung der Baugrubenböschungen am Bauplatz bereitgestellt und 13.000 Tonnen in der Kompostierung verwertet. Das Erdbaumaterial wurde von einer Aushubbegleitung vollständig gesichtet, vom Abbruchunternehmer gefasst und zu einem großen Teil in umliegenden Baustellen verwertet. Das Volumen des verunreinigten Erdmaterials konnte durch dieses Sichten und Fassen auf nur 15 % eingegrenzt werden.

Ein Drittel des Aushubmaterials wird vor Ort verwertet: 27.000 Tonnen Aushubmaterial verbleiben und werden auf der Baustelle eingesetzt. Davon sind 12.500 t im Zuge des Fundamentabbruchs gleich wieder eingebaut worden, um die Kreissegmente des ehemaligen Radstadions zu verfüllen, die aus dem rechteckigen Grundriss der neuen Sport Arena Wien ausgespart blieben. Weitere 15.000 t (d. h.

10.000 m³ lose) sind am Baufeld seitlich gelagert, um als Wiederverfüllung der Baugrube nach Fertigstellung des Untergeschosses auf kürzestem Wege eingebaut werden zu können. In mehreren Bauvorhaben konnten wir diese Maßnahme einer ökonomischen Bewertung durch den GU unterziehen, die auf eine Gewichtung - für 2022 valorisiert - von 15 €/m³ für das Nicht-Entsorgen, Nicht-Transportieren und Nicht-Wiederbeschaffen hinausläuft. Insbesondere in Zeiten des Energiesparens sollten diese Strategien der Vermeidung überflüssiger Lkw-Fahrten verpflichtend werden: 3.000 Last- und Leerfahrten mit einem Verbrauch von 24.000 l Diesel, einer Emission von ca. 75 t CO₂-Equivalenten und Kosten von 150.000 € konnten eingespart werden. Erweitern wir die Wirkungsanalyse auf die 50.000 t Baurestmassen können hier durch mobile Aufbereitung und Direktverfuhr zu den Anwendungsstätten ohne den Umweg einer stationären Anlage ca. 40.000 l Diesel und ca. 125 t CO₂-Equivalente gespart werden.

Bestandsgebäude in ihrem Materialwert auf Basis von BIM-Daten zu erfassen ist aktuell Gegenstand zahlreicher digitaler Geschäftsmodelle des E-o-L. Die Beurteilung der Wertigkeit der Wiederverwendung von Bauteilen spielt dabei ebenfalls eine Rolle. Neuere Forschung schlägt vor die Einstufung einer Rückbaubarkeit von Bauteilen mit dem Energieaufwand in Joule oder Kilojoule zu messen, um die Wertschöpfung in der Phase des E-o-L zu optimieren. Gleichzeitig versuchen einige digitale Plattformen die materiellen Gebäudewerte der verbauten Baustoffe auf Grundlage von BIM-Eingaben an den Börsenwert von Rohstoffen zu verbriefen und grundbücherlich zu verbuchen.

5.5.2. Benchmarking und Wertdichte-Analyse nicht-BIM-fähiger Gebäudekomponenten:

Um eine kritische Masse zur Bewertung der Wertdichte von nicht im BIM abbildbaren Gebäudekomponenten zu bekommen, hat das Forschungskonsortium beschlossen, einerseits Benchmarks für die Forschung über zusätzliche anonymisierte Use-Cases seitens BauKarussell (FPB) als Sammler, und andererseits seitens Altmetalle Kranner als Verwerter zu generieren. Die Werterlöse von Buntmetallen aus dem Rückbau sollen je nach Nutzungsart des Bestandes zur Bildung von Kategorien der Ausstattung beitragen und Aussagen zu Wertdichten nach m² BGF der urbanen Mine ermöglichen. Abbildung 26 gibt einen Überblick über die Menge verschiedener Metallfraktionen, die bei Rückbauprojekten unterschiedlicher Gebäudetypen pro Quadratmeter Bruttogrundfläche (BGF) gewonnen wurden. Durch den Vergleich zwischen dem Ferry Dusika Stadion, zwei Krankenhäusern und einem Bürogebäude lassen sich Rückschlüsse auf die Effizienz der Wertstoffrückgewinnung in Abhängigkeit vom Gebäudetyp ziehen.

Kupferkabel: Es wird deutlich, dass Kupferkabel unterschiedlicher Qualitäten (60%, 70%, 80%) über die verschiedenen Gebäudetypen hinweg variieren. Kupferkabel mit 60% Kupfergehalt zeigen die höchste Materialdichte im Ferry Dusika Stadion, während Kupferkabel mit 70% und 80% Kupfergehalt in Krankenhäusern in größerer Menge vorhanden waren.

Aluminium (gemischt) und Eisenschrott wurden ebenfalls in allen Gebäudetypen gefunden. Besonders auffällig ist die hohe Menge an Eisenschrott im Bürogebäude, was auf eine intensive Nutzung von Stahlkonstruktionen oder anderen eisenhaltigen Bauteilen hinweisen könnte.

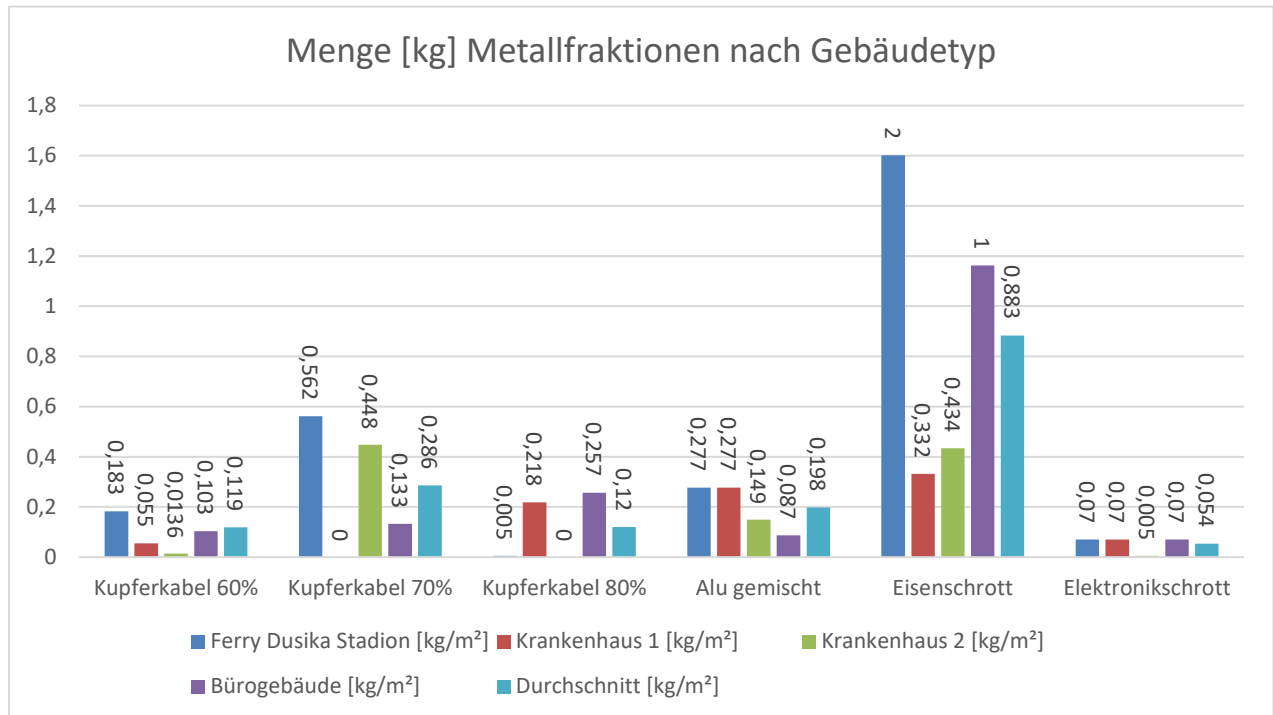
Beim Elektronikschrott zeigt sich eine bedeutende Variabilität mit einer Spitzenmenge im zweiten Krankenhaus. Dies könnte auf die spezifische Nutzung und Ausstattung der Krankenhäuser mit elektronischen Geräten zurückzuführen sein.

Durchschnittswerte: Die durchschnittlichen Werte für jede Metallfraktion geben einen Eindruck von der typischen Materialdichte, die bei Rückbauvorhaben zu erwarten ist. Während

Kupferkabel und Eisen die höchsten durchschnittlichen Mengen aufweisen, sind Aluminium und Elektronikschrott weniger dominant.

Die Daten deuten darauf hin, dass die Art des Gebäudes und seine ursprüngliche Nutzung wesentlichen Einfluss auf die Zusammensetzung und Menge der rückgewinnbaren Metalle haben. Die höheren Mengen an Kupfer und Eisen im Bürogebäude könnten beispielsweise auf eine stärkere Verkabelung und eine intensivere Nutzung von Stahlkonstruktionen hindeuten, während das zweite Krankenhaus aufgrund seiner spezifischen medizinischen Ausstattung mehr Elektronikschrott aufweist.

Abbildung 26: Benchmarks Materialdichte Wertstoffe pro m2 BGF © 2024 Romm ZT



5.5.3. Wertstoffe – Vergleich dreier unterschiedlicher Use Cases

Die Grundlage der Analyse bilden die Lieferscheinlisten von Altmetalle Kranner, die im Laufe des Forschungsprojekts gesammelt wurden. Durch eine systematische Auswertung dieser Listen wurden Schlüsselnummern festgehalten, um zu eruieren wie viel von jeder Schlüsselnummer in den verschiedenen Bauprojekten vorhanden ist. Dieser methodische Ansatz ermöglicht es Vergleiche anzustellen und detaillierte Einblicke in die Verteilung der Altmetalle je nach Gebäudenutzung zu erhalten. Auf ihren Wertstoffgehalt konnten so ein Amts-, ein Bank- sowie ein Bürogebäude untersucht werden (Abb. 27 - Abb. 29).

Ergebnisse: Die vorläufigen Ergebnisse unserer Analyse zeigen signifikante Unterschiede in der Häufigkeit und Menge der Schlüsselnummern in Abhängigkeit von der Art der Gebäudenutzung. Dies ermöglicht es uns, klare Benchmarks für den Einsatz von Altmetallen in verschiedenen Bauprojekten zu definieren. Darüber hinaus werden potenzielle Herausforderungen und Chancen für die Branche erörtert.

Abbildung 27: Aufstellung der vorgefundenen Wertstoffe, Beispielprojekt Amtsgebäude
© 2024 Romm ZT



Abbildung 28: Aufstellung der vorgefundenen Wertstoffe, Beispielprojekt Bürohaus
© 2024 Romm ZT

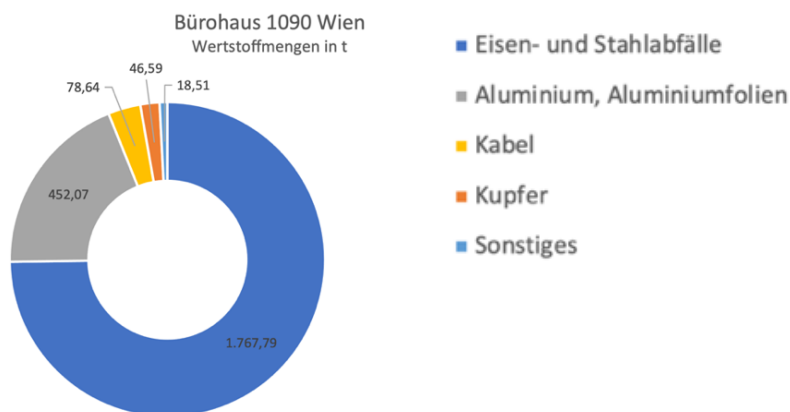
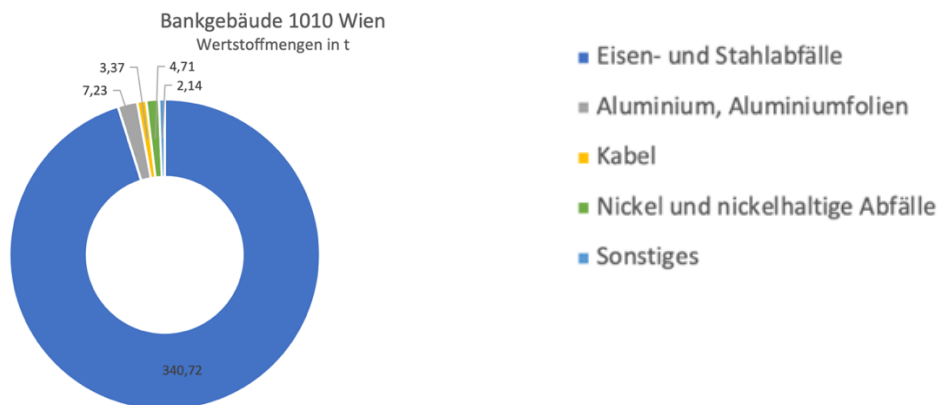


Abbildung 29: Aufstellung der vorgefundenen Wertstoffe, Beispielprojekt Bankgebäude
© 2024 Romm ZT



Mit den Szenarien des EoL in Bezug auf die Wiederverwendung und die stoffliche Wertdichte eines Gebäudebestandes stellen sich in dieser Hinsicht ganz entscheidende Fragen zu dem Thema welche Auswirkungen dies für die andere LZ-Phasen hat, insbesondere die Planung:

- ✓ Ab welchem Energieaufwand ist der verwertungsorientierte Rückbau und die Wiederverwendung von Bauteilen im EoL (nicht mehr) nachhaltig?
- ✓ Welche Bauteile rechtfertigen den Aufwand der Wiedergewinnung (in Jule)?
- ✓ Welcher Aufwand ermöglicht die stoffliche Wiedergewinnung der Ressourcen (in Jule) im Verhältnis zu seinen (börsennotierten) Wertdichten?
- ✓ Welche wesentlichen Wertstoffe sind möglicherweise nicht im BIM abgebildet und wie können sie abgeschätzt werden?

Basierend auf diesen Fragen werden anhand von Use Cases, unterschiedliche Benchmarks definiert.

→ Integration eines Benchmarksystems zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Benchmarking-Modell gem. Urban Mining Index²⁰: Um die Wirtschaftlichkeit der Rückbauprojekte zu bewerten, wurde ein Benchmarksystem eingeführt, das die Erlöse und Kosten in Relation setzt. Dieses System klassifiziert die Ergebnisse in Quartile, die von „äußerst positiv“ (Quartil IV) bis „äußerst negativ“ (Quartil I-) reichen. Jedes Quartil wird durch einen Faktor (f_v) repräsentiert, der den Grad der Wirtschaftlichkeit widerspiegelt. So ermöglicht beispielsweise ein Preis von 880 €/t den höchsten positiven Faktor von 1,3, während ein Preis von -146 €/t einen Faktor von 0,6 zuweist und somit als „äußerst negativ“ bewertet wird.

Mögliche Anwendung des Benchmarksystems: Bei der Anwendung auf die verschiedenen Rückbauprojekte wurden signifikante Unterschiede in der Wirtschaftlichkeit der Wertstoffrückgewinnung festgestellt. Beispielsweise erreichte das Ferry Dusika Stadion mit durchschnittlichen Erlösen von 5,08 €/m² für Kupfer eine hohe Wirtschaftlichkeit, die in das Quartil III (+) fällt. Im Gegensatz dazu zeigte das Bürogebäude mit Erlösen von 0,58 €/m² für Kupferkabel 40% eine niedrigere Wirtschaftlichkeit, die in das Quartil II (+) fällt.

FAZIT: Diese Beispiele zeigen, dass die ökonomische Bewertung von Rückbaumaterialien von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird, einschließlich des physischen Zustands der Materialien, der Marktnachfrage zum Zeitpunkt des Rückbaus und den spezifischen Eigenschaften des jeweiligen Gebäudes. Somit müssen diese Werte immer im Kontext der spezifischen Rückbausituation bewertet werden, und es sollten keine allgemeingültigen Annahmen über die Wertdichte ohne eingehende Analyse der individuellen Bedingungen eines Projekts getroffen werden.

5.6. Neue Geschäftsmodelle (GM) und Szenarien für E-o-L

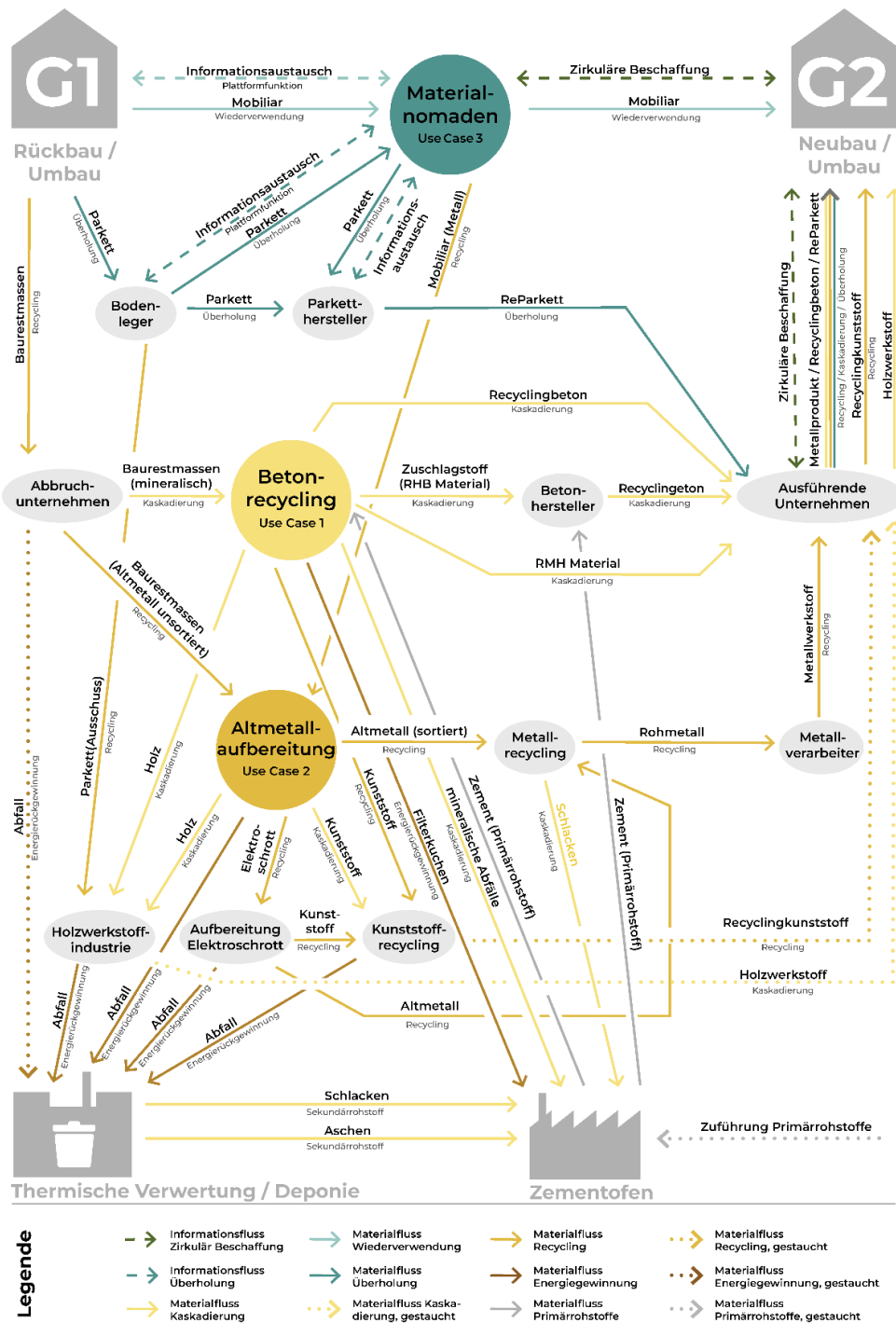
5.6.1. Netzwerk

Im Zuge der Entwicklung neuer GM, wurde ein prototypisches Netzwerk (Value Network), auf Basis der untersuchten Use Cases, entwickelt (Abb. 30). Es zeigt, dass Materialflüsse und Industriesymbiosen in

²⁰ Rosen, A. (2021), Urban Mining Index

einem Closed Loop geführt werden müssen, damit eine Kreislaufwirtschaft umgesetzt werden kann. Dies wurde durch die Interviews, den gesammelten Daten aus den Use Cases und aus der neu veröffentlichten ISO 59010 abgeleitet. Das Netzwerk zeigt, je niedriger in der Hierarchieebene, desto mehr Akteure und mehr Aktivitäten sind für den Closed-Loop notwendig.

Abbildung 30: Materialflüsse und mögliche Industriesymbiosen im Wertschöpfungsnetzwerk
 © 2025 TU Wien



Der Übergang zu einem geschlossenen Kreislaufsystem ist jedoch nicht ohne Herausforderungen. Er erfordert einen Paradigmenwechsel in der Designphilosophie, eine Hinwendung zu Geschäftsmodellen, die eine Verlängerung der Produktlebensdauer unterstützen können, und die Entwicklung von Märkten für Sekundärmaterialien. Er hängt auch von der Einrichtung effektiver Sammel- und Verarbeitungssysteme ab, die die Rückgabe gebrauchter Produkte zur Wiederaufarbeitung oder zum Recycling unterstützen können.

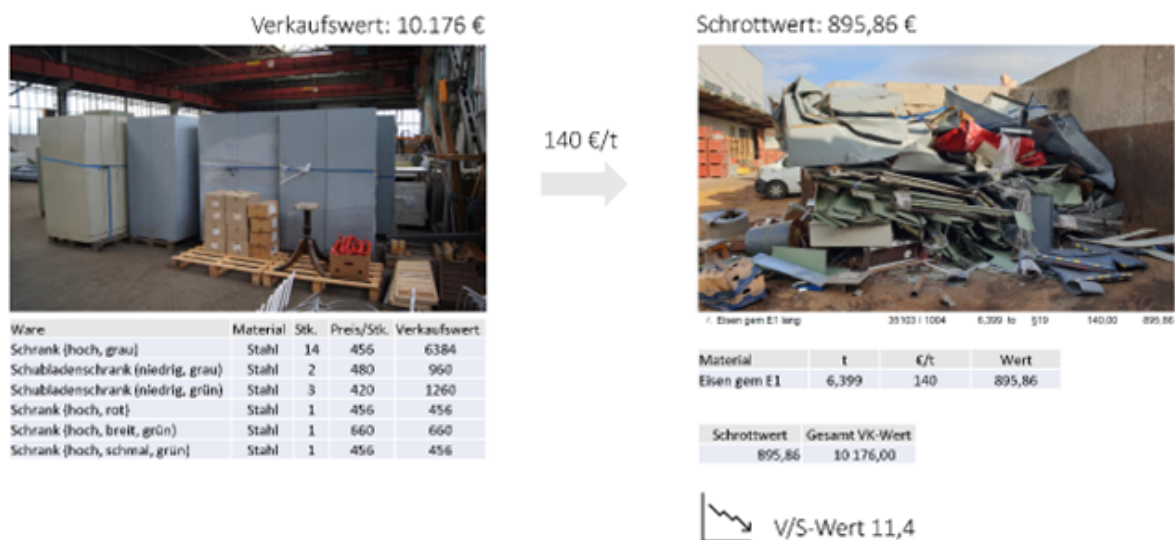
5.6.2. Wirtschaftlichkeitsanalyse

Als Beispiel einer Wirtschaftlichkeitsanalyse im Rahmen der CE, wurde der Recyclingprozess von Schwerlastschränken dokumentiert. Die Firma materialnomaden steigt mit ihrem Geschäftsmodell zu einem frühen Zeitpunkt in den Rückbauprozess ein, wodurch ein hohes Ausmaß der im Material gebundenen finanziellen Werte erhalten werden kann. Im Gegensatz zum reinen Rohstoffwert von Materialien, welcher durch Recycling erzielt werden würde, bietet ein wertorientierter Rückbau die Möglichkeit, einer wesentlich höheren ökonomische Werterhaltung. Um diesen Sachverhalt näher zu untersuchen wurde der Recyclingprozess von Schwerlastschränken dokumentiert und dem Prozess der Wiederverwendung gegenübergestellt (s. Abb. 31). Der somit mögliche Vergleich zwischen Wiederverkaufswert und Schrottwert zeigt in diesem Fall, dass ein monetärer Wertverlust von ca. 91% entsteht, wenn derart werthaltige Produkte dem Recycling zugeführt werden. Die dem Recycling zugeführten metallischen Rohstoffe bleiben hingegen zu fast 100% erhalten.

Abbildung 31: Vergleich Produktwert bei Wiederverwendung und Schrottwert © 2024 TU Wien

Vom Schrank zum Schrott

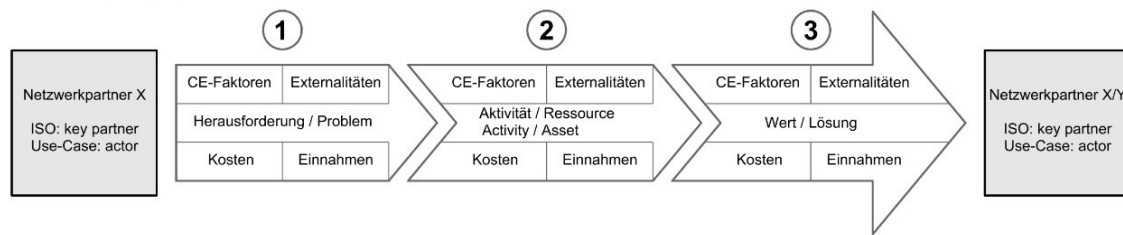
Wertverlust - Rohstofferhalt



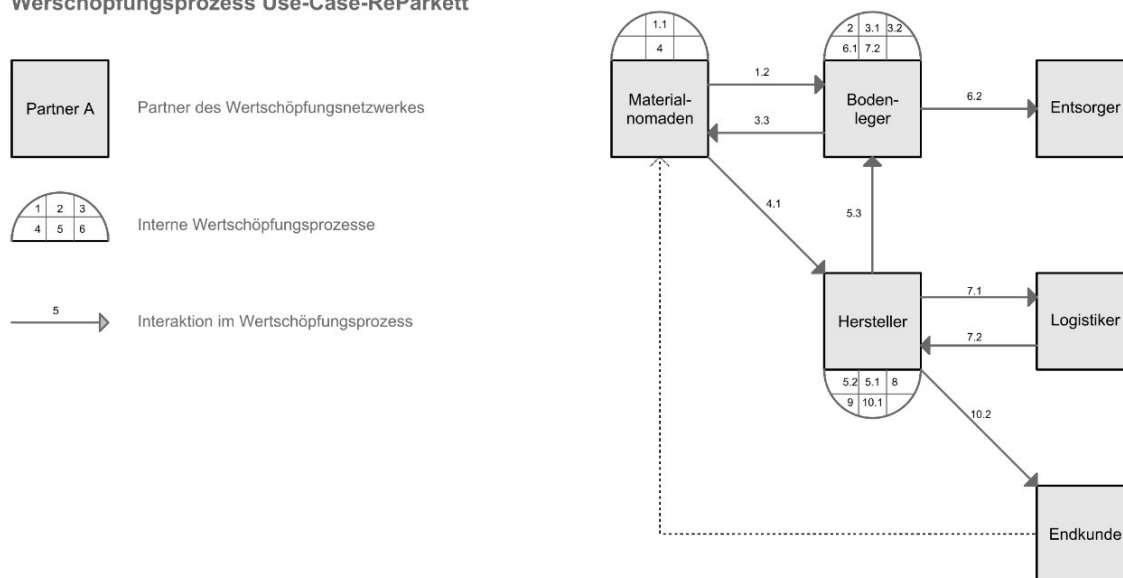
Neue GM wurden entwickelt und eine Umsetzung dieser mit BIM und Blockchains untersucht. Berücksichtigt wird die bestehende Wertschöpfungskette der Baumaterialien/Baukomponenten im Gebäudelebenszyklus und die Auswirkung auf die E-o-L-Phase. Aus den konzipierten GM werden verschiedene Szenarien für eine Digitalisierung der E-o-L-Prozesse gebildet. Notwendige Anpassungen von GM werden identifiziert, um eine spätere Implementierung zu ermöglichen. Dabei werden Prozesse, Datenflüsse und die Wechselwirkungen entwickelt und mit Hilfe von BPMN (Business Prozess Modelling Notation) Diagrammen festgehalten.

- Der Use Case ReParkett wurde mit Hilfe eines Prozessdiagramms dargestellt, um die für die Wertschöpfung entscheidenden Vorgänge zu identifizieren (siehe Abb. 32).

Abbildung 32: Wertschöpfungsprozess nach ISO 59010 (oben) & Wertschöpfungsprozess Use Case ReParkett (unten) © beide Abb.: 2024 TU Wien



Werschöpfungsprozess Use-Case-ReParkett

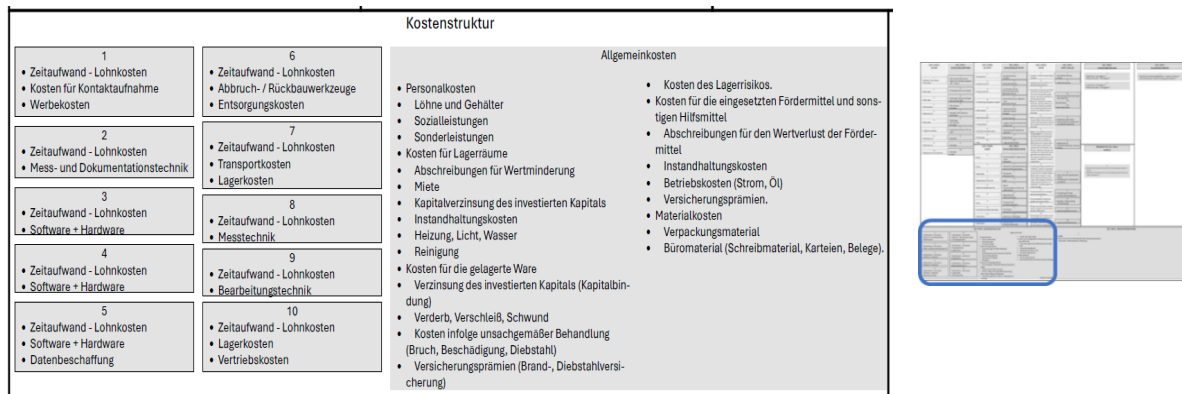


Im Rahmen dieser Untersuchung stellte sich heraus, dass mit dem derzeitigen Stand der Wertschöpfungsketten in CE, Unternehmen die sich auf das Thema Reuse spezialisiert haben (wie es hier die Materialnomaden sind), obwohl eigentlich Initiatoren des Wertschöpfungsprozesses, diese selbst nur rudimentär in diesen involviert sind. Zu den wichtigsten Funktionen, die die Materialnomaden in diesem Zusammenhang erfüllen, zählen Informationsaustausch, Koordinationsaufgaben und das Bereitstellen einer Plattform - alles Leistungen die in diesem Fall nur schwer monetarisierbar sind. Vor diesem Hintergrund fällt besonders ins Gewicht, dass Reuse-Produkte nur selten günstiger zu erwerben sind als Neuware, was mit der mangelhaften Internalisierung externer Kosten begründet werden kann.

Eine geringere Abhängigkeit von Rohstoffimporten und somit von globalen Lieferketten- und Preisproblematiken, wurde als größter wirtschaftlicher Vorteil, kreislaufwirtschaftlich orientierter GMs identifiziert.

Im Projektverlauf wurde ein integrales, ganzheitliches Business Model (BM)-Framework entwickelt, welches durch die Verknüpfung von System Dynamics, Business Modell Canvas (im Projekt basierend auf Business Model Canvas von Osterwalder/Pigneur & erweitert um Elemente aus ISO 59010) sowie Analysen der Wertschöpfungsketten (aus Use Cases) entstand (s. Abb. 33). Es dient auch dazu aufzuzeigen welche Hebelpunkte und potenzielle Risiken der CE existieren.

Abbildung 33: Kostenanalyse anhand BMC © 2024 TU Wien



5.6.3. DPP Geschäftsmodelle

Auf Ebene der EU wurde 2015 der erste und 2020 der zweite EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft beschlossen, beide verfolgen das Ziel die Kreislaufwirtschaft in Europa zu fördern. Am 18. Juli 2024 trat die neue Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte [Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR)] in Kraft. Sie soll sicherstellen, dass die Lebensdauer von Produkten erhöht wird und sie leichter repariert oder recycelt werden können. Außerdem soll erreicht werden, dass Energie und Ressourcen effizienter genutzt und mehr recycelte Materialien verwendet werden. Auch verbesserte Wettbewerbsbedingungen für nachhaltige Produkte und eine bessere Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen, die nachhaltige Produkte anbieten, soll so erreicht werden.²¹

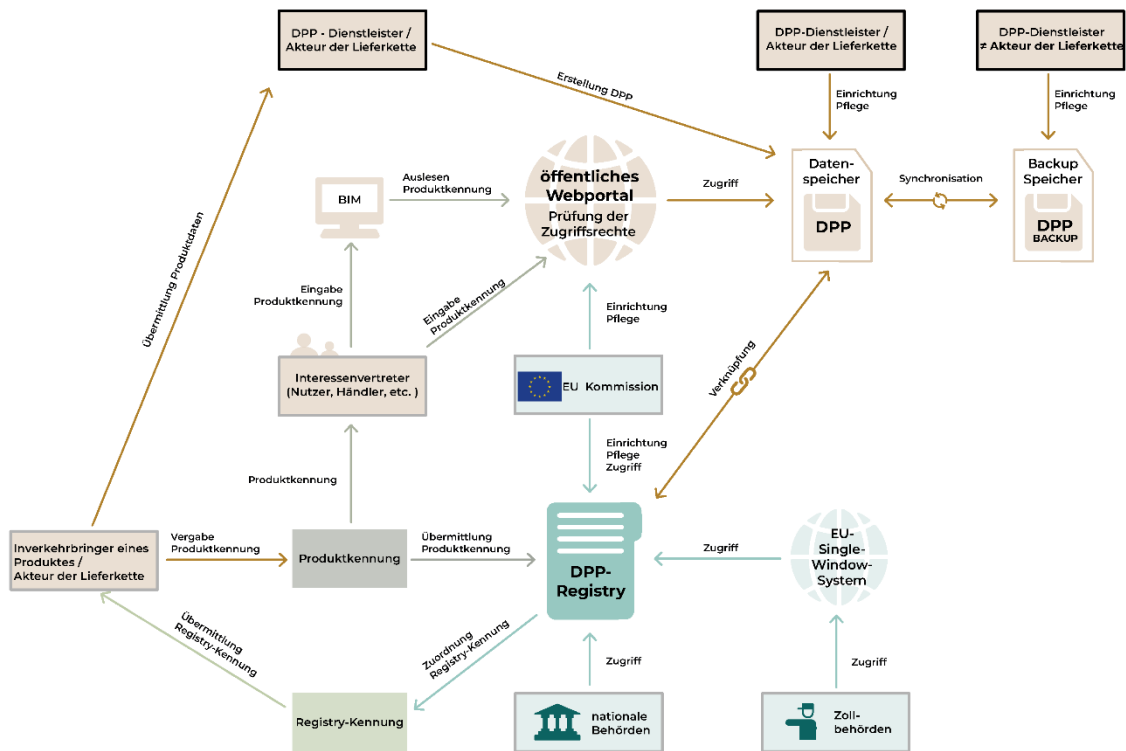
Wichtigstes Werkzeug zum Erreichen dieser Ziele ist der Digitale Produktpass (DPP)²². DPPs stellen digitale Dokumente dar, welche detaillierte Informationen über ein Produkt sowie dessen Wertschöpfungskette enthalten. Um DPPs und das dahinterliegende System betreiben zu können sind verschiedene IT-Dienstleistungen und eine entsprechende IT-Infrastruktur notwendig. Die ESPR sieht vor, dass diese Leistungen von privatwirtschaftlichen DPP-Dienstleistern erbracht werden. Hieraus kann sich eine Vielzahl neuer Geschäftsmodelle der CE entwickeln (siehe Abb. 41). Vor diesem Hintergrund werden neue Geschäftsmodellen entstehen, deren Leistungen darin bestehen, die zur Erstellung und Verwaltung von DPPs, sowie dem Betrieb des DPP-Systems, erforderlichen Aufgaben zu erfüllen.

Diese neuen Geschäftsmodelle können folgende Leistungen beinhalten welche im Rahmen der Einführung der DPPs notwendig werden (siehe Abb. 34): 1) regelkonforme DPPs zu erstellen und deren Anpassung an neue Regeln und Gesetze umzusetzen; 2) Einrichtung und Pflege des Datenspeichers in dem ein oder mehrere DPPs hinterlegt werden, um interessierten Parteien, den ihren Zugriffsrechten entsprechenden Zugang zu ermöglichen; 3) Verknüpfen der DPPs mit digitalen Gebäudemodellen (wie BIM-Modellen); 4) Erstellen einer Sicherungskopie durch einen unabhängigen DPP-Dienstleister; 5) Analyse- und Dokumentationsdienstleistungen im Rahmen erweiterter Berichtspflichten.

²¹ https://germany.representation.ec.europa.eu/news/okodesign-verordnung-neue-regeln-fur-nachhaltige-produkte-kraft-2024-07-19_de (abgerufen am 19.03.2025; 16:27)

²² <https://plattformindustrie40.at/digitaler-produktpass-2/> (abgerufen am 8.4.2025; 10:51)

Abbildung 34: DPP-System und DPP-Akteure © 2025 TU Wien



5.7. Framework DiCYCLE

- Das DiCYCLE-Framework wurde entwickelt, um die digitale Verwaltung von ermittelten Szenarien zu unterstützen. Für ein ausgewähltes Szenario wurde ein Testfall erstellt, der die Zusammenarbeit der einzelnen Komponenten verdeutlicht. Basierend auf den Erkenntnissen aus den Vorgängerprojekten FMChain (FFG-Nr. 873827) und BIMd.sign (FFG-Nr. 873842) wurden passende Smart Contracts entwickelt und als Proof-of-Concept umgesetzt. Dabei wurde die Systemarchitektur und das Framework dieser Projekte an relevanten Stellen erweitert und optimiert, um End-of-Life-Prozesse abbilden zu können. Im Gegensatz zu früheren Ansätzen, bei denen Geschäftsprozesse vollständig auf Blockchain-Technologien abgebildet wurden, verfolgt DiCYCLE einen innovativen Ansatz. Dieser findet zunehmend Anerkennung in der akademischen Literatur und kombiniert Geschäftsprozessmanagement mit Blockchain-Technologien auf eine neuartige Weise.
- Ein Szenario für ein neues digitales Geschäftsmodell, das auf einem Closed-Loop-System für Wiederverwendung basiert, wurde am Beispiel des Use Case „ReParkett“ der Projektpartner Materialnomaden analysiert und dargestellt (siehe Abb. 38).

5.7.1. Systemarchitektur Blockchain

Beim ersten Einsatz der Blockchain-Technologie im Bereich des Geschäftsprozessmanagements wurden Prozessmodelle vollständig auf Blockchains abgebildet, indem Modelle in Smart Contracts übersetzt wurden (Weber et. al. 2016, García-Bañuelos et. al. 2017, López-Pintado et. al. 2019). Dieser erste Ansatz, alle Daten (einschließlich Akteure, Gateways usw.) auf der Blockchain abzubilden, ist aus mehreren Gründen problematisch: Bei der Umsetzung von Prozessen, an denen mehrere Akteure beteiligt sind, treten im Allgemeinen zwei grundlegende Hindernisse auf. Erstens werden grundlegende Datenschutzerfordernisse von Unternehmen verletzt: Unternehmen möchten in der Regel vermeiden, dass ihre eigenen Daten, die mit ihren Geschäftsprozessen in Verbindung stehen (z. B. Lieferkettendaten, Produktionsprozessdaten usw.), für Dritte offen sichtbar sind. Dies wurde auch von unseren Interviewpartnern in unserer Anforderungsanalyse für unseren Anwendungsfall bestätigt. Darüber hinaus ist die Speicherung von Daten auf einer Blockchain aufgrund der hohen Transaktionskosten unattraktiv. Dies gilt insbesondere für sogenannte *public* Blockchains wie Bitcoin oder Ethereum. Diese sind, wie der Name schon sagt, für jeden sichtbar und offen nutzbar. Dies ist jedoch auch ein Nachteil, da die begrenzte Anzahl möglicher Transaktionen pro Sekunde zu hohen Transaktionskosten für die Teilnehmer führen kann. Private Blockchains, also Blockchains, die nicht für jeden einsehbar sind und von einer kleinen Anzahl von Teilnehmern betrieben werden, haben diese Einschränkung in viel geringerem Maße, weisen aber andere Nachteile auf, wie z. B. fehlende Netzwerkeffekte; und es fehlt auch die Möglichkeit der öffentlichen Verifizierung (Carminati et. al. 2018, Marangone et. al. 2022) bzw. auch wie ein größeres Zentralisierungsrisko oder mangelnde Annahme der Technologie in der Industrie.

Zusammenfassend kann man schließen, dass es zum einen sinnvoll ist, möglichst wenig Daten auf der Blockchain zu hinterlassen und grundsätzlich nur genau so viel, dass die positiven Eigenschaften von Blockchains voll ausschöpfbar sind, während die negativen Eigenschaften minimiert werden können. Zum anderen sollten aber jene Daten, welche auf Blockchains hinterlassen werden auch Privatsphäre Anforderungen von Unternehmen genügen, weshalb es ebenso wichtig ist, die noch vorhandenen Daten so sehr es geht zu verschleiern.

Vor diesem Hintergrund wurden die Designentscheidungen in DiCYCLE getroffen sowie die Vorgehensweisen für Blockchain definiert. Abbildung 35 zeigt, wie die Blockchain als Technologiekomponente eingebunden wird. Während die wesentliche Kommunikation zwischen den einzelnen Teilnehmern *off-chain* erfolgt, also abseits der Blockchain, wird die Interaktion mit der Blockchain auf ein wesentliches beschränkt, indem nur *commitments*, welche unwiderrufliche Aussagen über bestimmte Sachverhalte darstellen auf die Blockchain abgelegt. Diese benötigen nur einen Bruchteil der Daten, die tatsächlich bei den einzelnen Teilnehmern liegen und sind dennoch unverfälschbar.

Abbildung 36 zeigt Die Komponenten unserer aktuellen Softwarearchitektur. Die Architektur kann in 5 Module gegliedert werden: das Blockchain-Modul, sowie das Messaging-, das BPMN-, das Exekution-, und das UI-Modul. Das BPMN-Modul beinhaltet die notwendige Logik, um ein bestehendes BPMN-Modell (definiert in xml) in eine für uns verwendbare Repräsentation umzuwandeln, während das Exekution-Modul die wesentlichen Bausteine, die zur Verwaltung eines laufenden Prozesses (Verwalten des Zustandsautomaten, Nachrichtenverwaltung, Abgleich von erwarteten Nachrichten zu erhaltenen Nachrichten, etc.) Das Modul Messaging dient zum Datenaustausch zwischen den einzelnen Teilnehmern und das UI-Modul zur graphischen Darstellung der Daten. Letzteres wurde in unseren Prototypen nicht umgesetzt, nachdem ein größerer Fokus auf die Backend Komponenten und

deren wesentliche Weiterentwicklung im Vergleich zu den bestehenden Prototypen der Vorgängerprojekte bestand.

Abbildung 35: High-level Überblick über die Interaktion mit der Blockchain © 2025 TU Wien

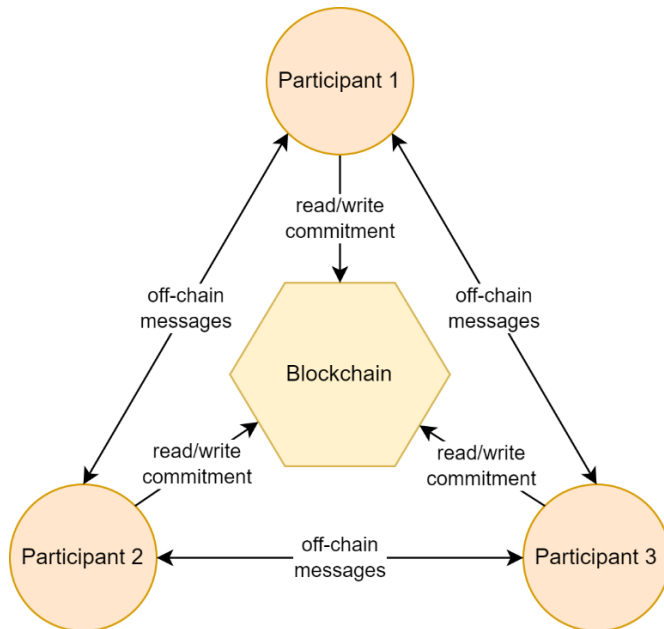
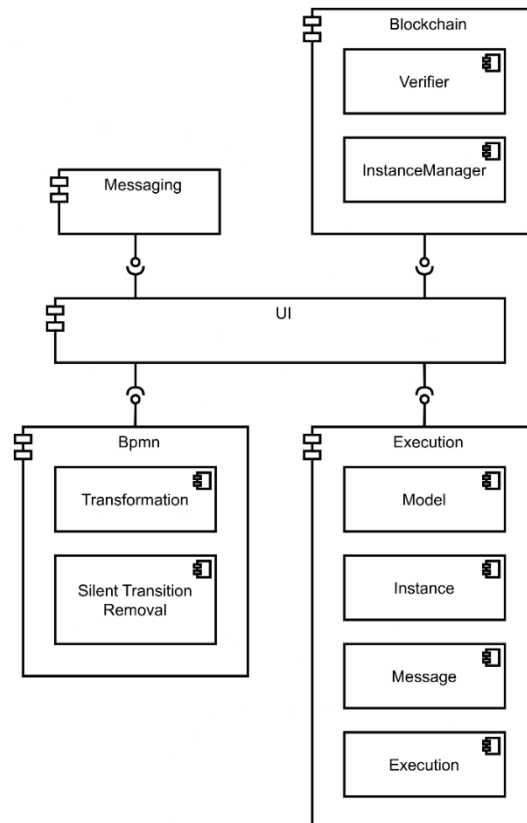
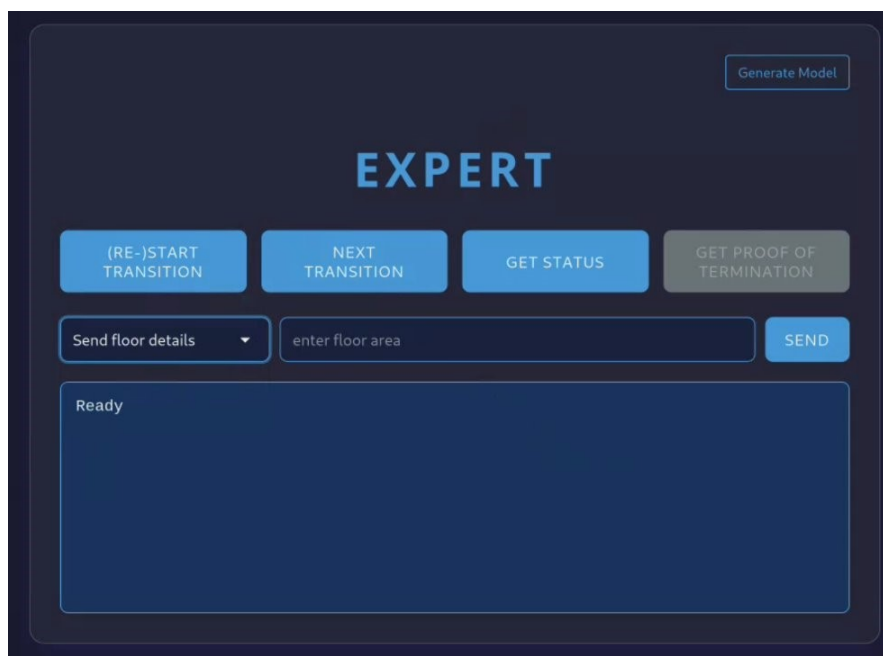


Abbildung 36: Softwarearchitektur © 2025 TU Wien



Ein zentrales Element des Projekts stellt der Einsatz von Zero-Knowledge Proofs. Ein Zero-Knowledge Proof (ZKP) wird als Interaktion zwischen einem „Prover“ und einem „Verifier“ eingerichtet. Das Ziel des „Provers“ ist es, den „Verifier“ von der Korrektheit einer Berechnung zu überzeugen, ohne den vollständigen Satz von Eingaben preiszugeben (Goldreich und Oren 1994; Tomaz et al. 2020). ZKPs bieten daher die Grundlagen für eine sichere Authentifizierung und den Schutz der Privatsphäre bei Blockchain-Transaktionen, indem sie eine Plattform für die Interaktion zwischen den Beteiligten schaffen, ohne dass sensible Daten offengelegt werden müssen (Meralli, 2020; Čapko et al. 2022). Während ZKPs als mehrrundeninteraktive Protokolle konzipiert wurden, sind die aktuellen Varianten nicht interaktiv, d. h., es wird nur eine einzige Nachricht zwischen dem Prüfer und dem Verifizierer ausgetauscht. Diese Eigenschaft ermöglicht es, ZKPs in Blockchain-Transaktionen einzubeziehen. Darüber hinaus ermöglichen zk-SNARKs, eine hocheffiziente nicht-interaktive Variante mit kleinen Beweisgrößen, die Speicherung und Verifizierung in der Blockchain (Partala et. al. 2020). Das Use Case ReParkett wurde intensiv analysiert und im Zuge dessen ein einfaches User Interface entwickelt (s. Abb. 37), welches den einzelnen Akteuren – Material Experte, Parkettextraktor, Parkettwiederaufbereiter und Käufer - ermöglicht, durch die einzelnen Prozessschritte zu navigieren und die notwendigen Daten (zum Beispiel weitergegebene Fläche des Parketts in Quadratmeter) bekannt zu geben. Im Hintergrund kommuniziert das Userinterface mit den anderen Modulen der entwickelten Architektur, welche den Prozessfortschritt und die Korrektheit der Daten verifizieren. In diesem Fall wird zum Beispiel von Prozessschritt zu Prozessschritt kontrolliert, dass die weitergereichte Parkettfläche stets nur gleich groß oder weniger wird und nie mehr, damit am Schluss nicht mehr Parkett aus dem Prozess raus geht, als hineingegangen ist (Stichwort “Greenwashing”).

Abbildung 37: Beispielhaftes User Interface des Framework DiCYCLE anhand des Reparkett Usecase © 2025 TU Wien



Für den Use Case ReParkett (Wiederverwenden von altem Parkettboden) wurde das verbesserte Framework ausführlich getestet. Dataspace Konnektoren wurden für die einzelnen Akteure und deren Prozessschritte angepasst, sodass ein automatisierter Datenaustausch zwischen den Beteiligten möglich wird. Dieses Modul zeigt eine von mehreren Möglichkeiten des automatisierten Datenaustauschs zwischen mehreren Parteien auf und verfolgt einen Ansatz, bei welchem sich die Teilnehmer auf einheitliche Standards hinsichtlich des Datenaustausches, der Identitätsverwaltung, etc. einigen. Das Konzept von Dataspaces wurde in den letzten Jahren viel erforscht und zielt darauf ab, die Datensouveränität von teilnehmenden Akteuren zu wahren, während einheitliche Schnittstellen zwischen diesen Akteuren einen verbesserten Austausch dieser Daten ermöglichen. Entgegen einem zentralistischen Ansatz wird dadurch eine selbstverwaltete Organisation von Daten möglich, welche Monopolstellungen von einzelnen Akteuren unterbindet. Der Datenfluss wird somit nicht nur verbessert (zum Beispiel können keine manuellen Kopierfehler von Daten auftreten, da diese nicht mehr manuell von einem ins andere System kopiert werden müssen), sondern auch schneller abgewickelt (im Vergleich von manuell geschriebenen E-Mails oder Telefonanrufen). Zugleich behält jeder Akteur entlang des Prozesses die Datenhoheit und muss nicht auf einen Drittanbieter ausweichen, welcher den Prozess zentral steuert.

5.7.2. Proof-of-Concept mit Testfall ReParkett

Der Testfall für ein neues digitales Geschäftsmodell als Closed Loop mit ZKP für Refurbishment wurde anhand Use Case ReParkett der Projektpartner materialnomaden analysiert und als proof-of-concept getestet. Dazu wurde zuerst der Prozess aufgeschlüsselt (Abb. 38) wie folgt: Der Rückbau von großen m²-Flächen Parkett in der ehemaligen Wiendirektion (BIG, Mariannengasse, sowie das Vorhaben circa 1200m² Parkett in ein Bauträgerprojekt in St.Pölten einzubauen, führt zur Idee der maschinellen Aufbereitung der einzelnen Parkett-Stäbe. Mit der Firma Weitzer wird die Produktentwicklung in die nächste (umsetzungsorientierte) Phase gebracht. Ein- und Ausbau findet mit dem dritten Kooperationspartner, einem Bodenlegerbetrieb als dem benötigten Verbindungsglied, um den Produktkreislauf zu schließen. Für den Rückbau arbeiten innerhalb der Genossenschaft alle drei Betriebe an einem Handbuch um so einen systematisierten Ernteablauf in das Geschäftsmodell einzubinden.

Abbildung 38: ReParkett Prozessanalyse © 2024 TU Wien

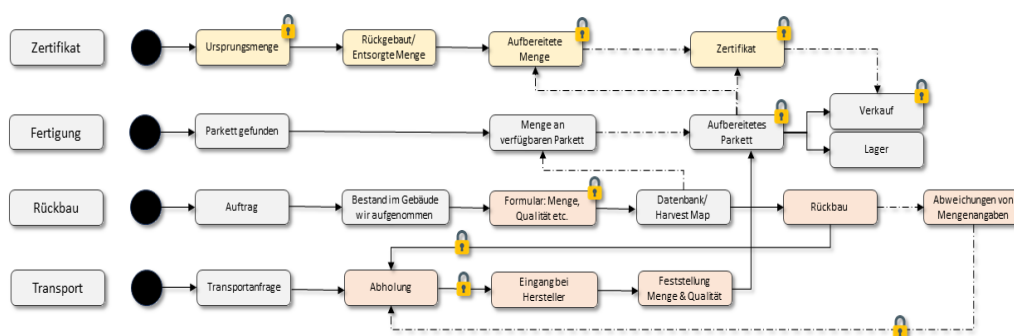


Abbildung 39: ZK-Proofs Use Case ReParkett in einer einfachen BPMN Choreographie
 © 2024 TU Wien

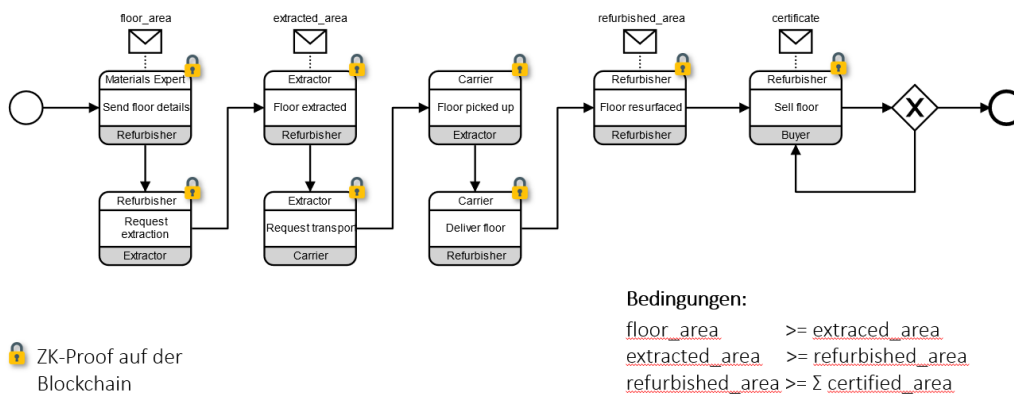


Abbildung 39 zeigt den Prozess stark vereinfacht als BPMN Choreographie Diagramm. Diese Diagrammtypen werden von dem in DiCYCLE entwickelten Prototypen als Ausgangsbasis verwendet, um eine nachvollziehbare und unverfälschbare Version des Prozesses auf der Blockchain zu verankern. Jedes Kästchen stellt eine Aufgabe des Nachrichtenaustauschs dar und zeigt die beiden Beteiligten in Form von Absender und Empfänger sowie die durchgeführte Aktion an. Diese Modellierungsmethode führt zu einer klaren Definition der Reihenfolge, in der die Beteiligten einbezogen werden, und der zwischen ihnen ausgetauschten Informationen. Die Interaktion mit der Blockchain beschränkt sich auf wesentliche Verpflichtungen und die damit verbundenen ZKP (in Abb. 39 als Vorhängeschlösser dargestellt), die mit einem Smart Contract auf der Blockchain verifiziert werden. Dies erleichtert die unveränderliche und öffentlich überprüfbare Zuordnung von Daten, ohne dass zusätzliche oder nicht offenlegbare private Informationen preisgegeben werden.

Unser Framework nutzt diese Technik, um die Korrektheit privater Prozesse in einer öffentlichen Blockchain sicherzustellen. Genauer gesagt signalisieren die Teilnehmer den Abschluss einer Choreografie-Aufgabe, indem sie sich gegenseitig Nachrichten außerhalb der Blockchain senden. Darüber hinaus verpflichten sie sich zu diesen Nachrichten, indem sie eine Transaktion, die aus einem Verweis auf die Nachricht und den Prozessstatus besteht, zusammen mit einer ZKP an die Blockchain senden. Ein Smart Contract überprüft die Korrektheit der ZKP und aktualisiert den Prozessstatus nur im Erfolgsfall. Die ZKP stellt sicher, dass nur im Modell definierte Übergänge ausgeführt werden können, dass nur die berechtigten Teilnehmer einen Übergang auslösen können und dass die übermittelten Informationen einige vordefinierte Regeln erfüllen. Im Fall des Anwendungsfalls ReParkett kann beispielsweise nur der *Extractor* die Aufgabe *Floor extracted* abschließen, indem er eine Nachricht an den *Refurbisher* sendet. Darüber hinaus muss der Wert von *extracted_area* kleiner oder gleich dem Wert von *floor_area* sein, der vom *Materials Expert* in der ersten Aufgabe bereitgestellt wurde, auch wenn dies in der Abbildung nicht dargestellt ist.

Auf den gesamten Anwendungsfall re:parkett übertragen, ermöglicht das Framework die Erstellung eines Herkunftsnachweises. Ein Verweis auf den Status in der SC belegt die Gültigkeit des Zertifikats, da nur konforme Prozessaktualisierungen an die Blockchain übermittelt werden können und daher die Angaben in den Zertifikaten korrekt sein müssen. Im Fall von ReParkett stellt das Zertifikat sicher, dass die Menge des als recycelt zertifizierten Bodens die vom Experten ermittelte Menge nicht überschreiten kann.

Das Beispiel zeigt, dass unser Rahmenwerk für viele Anwendungsfälle in der Lieferkette im AEC-Bereich sehr gut geeignet ist. Durch die Übernahme unseres Ansatzes der Warenverfolgung wird es möglich, Datenschutzanforderungen und -gesetze einzuhalten und gleichzeitig das Vertrauen und die Sicherheit für digitale Prozesse im CE-Bereich zu erhöhen.

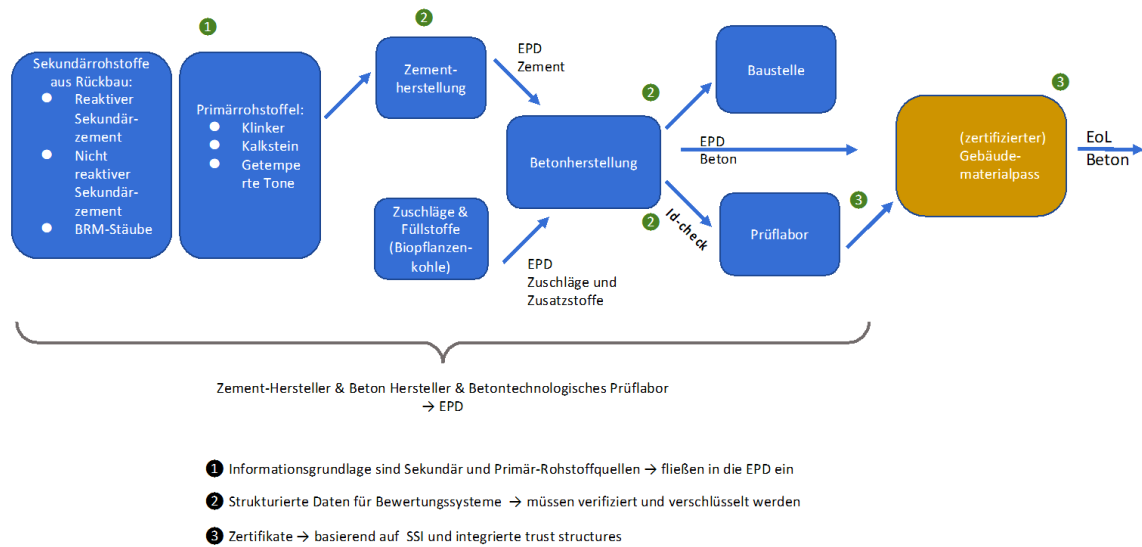
5.8. Technologische Innovationen und Weiterentwicklungen

1. In DiCYCLE haben wir die Integration der Blockchain-Technologie in E-o-L-Prozessen innerhalb anhand einer spezifischen Fallstudie eines Kreislauf-Wiederverwendungsprodukts in Österreich untersucht. Die Anwendung einer Blockchain-basierten Lösung hat ein erhebliches Potenzial zur Bewältigung von Herausforderungen in Bezug auf Transparenz, Authentizität und Vertrauen durch überprüfbare, datenschutzfreundliche Mechanismen, insbesondere Zero-Knowledge-Proofs, aufgezeigt.

Unsere Forschung bestätigt, dass digitale Technologien wie Blockchain für die Förderung der Kreislaufwirtschaft von entscheidender Bedeutung sind, indem sie transparente und zuverlässige Daten während des gesamten Produkt- und Materiallebenszyklus gewährleisten. Die Umsetzung unseres Blockchain-Frameworks bei der Wiederverwendung von Parkettböden zeigt effektive digitale Strategien für reale Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft auf. Dies verbessert die ökologische Nachhaltigkeit und schafft wirtschaftlichen Wert durch die potenzielle Generierung von CO₂-Zertifikaten (z. B. möglicherweise auf einem Token veröffentlicht, das sich auf die CO₂-Emissionen eines Produkts oder eines Teils eines Produkts bezieht), womit die Einhaltung der EU-Taxonomie gewährleistet ist. Die Ergebnisse sprechen für eine stärkere Integration digitaler Tools in CE-Prozesse, insbesondere im Bausektor, um die Ressourceneffizienz zu verbessern.

2. Die digitalen Geschäftsmodelle, die in DiCYCLE zur Identitätsprüfung und Lieferketten entwickelt werden, sind unter anderem von hohem Interesse für die digitale Begleitung der Dynamisierung des Bauens mit Beton, als Use Case für Recycling (Wiederverwertung). Besonders gilt das für die sich zunehmend digitalisierende Logistik auf Baustellen und labortechnischer Begleitung. Die Einführung digitaler Identitätsprüfungen für diversifizierte Betonrezepturen unterstützt die Digitalisierung mit EPDs (Environmental Product Declaration), die in die Gebäudezertifizierung einfließen. durch die Implementierung digitaler Identitätsprüfungen für Baumaterialien könnten Baufirmen und Lieferanten einen effizienteren und transparenteren Ablauf gewährleisten. Dies könnte beispielsweise bedeuten, dass jede Betonlieferung eine eindeutige digitale Kennzeichnung erhält, die Informationen über Herkunft, Qualität, Transportweg und weitere relevante Daten enthält. Die digitale Identität von Baumaterialien könnte nicht nur die Rückverfolgbarkeit und Qualitätssicherung verbessern, sondern auch dazu beitragen, die Nachhaltigkeit im Bauen auch im E-o-L zu fördern. Die Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle, die auf der Nutzung solcher digitalen Identitätsprüfungen basieren, ist somit essenziell für die zukünftige Kreislauffähigkeit in der Branche (Abb. 40).

Abbildung 40: Verwertungserlöse und Entsorgungskosten für Bau- und Abbruchabfälle
© 2024 TU Wien



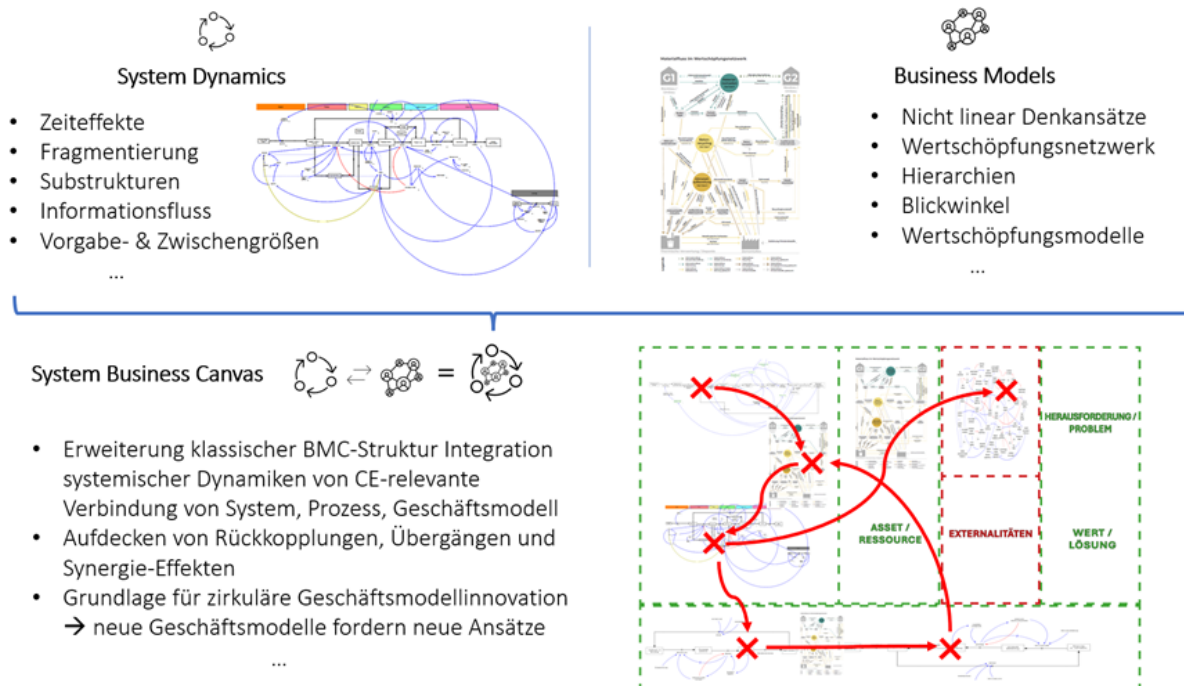
3. Ein zentrales Element des Projekts stellt der Einsatz von Zero-Knowledge Proofs (ZKPs) dar. Diese ermöglichen den Nachweis der Einhaltung definierter Regeln – etwa, dass alle Baurestmassen eines Rückbauprojekts ausschließlich bei zugelassenen Stellen abgegeben wurden – ohne dabei sensible Daten offenzulegen. So kann überprüft werden, dass ein Prozess ordnungsgemäß abgelaufen ist, ohne Geschäftsgeheimnisse oder datenschutzrelevante Details preiszugeben. Die dabei generierten Nachweise können auf öffentlichen Blockchains gespeichert werden. Dadurch wird es möglich, dass nicht nur staatliche Institutionen, sondern auch zivilgesellschaftliche Akteure die Einhaltung bestimmter Umweltstandards überprüfen können – auf transparente und fälschungssichere Weise.

Im Projekt wurde ein datensparsamer Ansatz gewählt, bei dem nur die für die Verifizierung notwendigen Informationen in verschlüsselter Form auf der Blockchain abgelegt werden. Damit lassen sich viele der typischen Herausforderungen von Blockchain-Anwendungen – etwa hohe Transaktionskosten oder mangelnde Skalierbarkeit – umgehen, ohne auf die zentralen Vorteile wie Unveränderbarkeit und Transparenz zu verzichten.

4. Zusammenführung System Dynamics und Business Models: Die Abbildung 41 visualisiert die integrative Verbindung zwischen System Dynamics und Geschäftsmodellen zu einem erweiterten System Business Canvas im Kontext der Kreislaufwirtschaft. Im oberen Bereich der Abb. 41 sind die zwei methodischen Perspektiven hervorgehoben. Dabei bildet System Dynamics die zentralen Analyseaspekte wie Zeiteffekte, Fragmentierung, Substrukturen, Informationsflüsse sowie die Betrachtung von Vorgabe- und Zwischenvariablen ab. Diese Methode dient dazu, Wechselwirkungen und systemische Dynamiken innerhalb von End-of-Life Prozessen, also auch Gesamtprozessen sichtbar zu machen. Parallel dazu ist der Ansatz für Geschäftsmodelle ersichtlicher. Hier liegt der Fokus auf nicht-linearen Denkansätzen - im Gegensatz zu „business as usual“ Geschäftsmodellen, der Abbildung von Wertschöpfungsnetzwerken sowie der Berücksichtigung verschiedener Sichtweisen und Hierarchien innerhalb der Wertschöpfung. Die Integration der ISO

59010:2024 sowie die Erweiterung des klassischen Business Model Canvas um CE-spezifische Aspekte verdeutlichen die Transformation von linearen zu zirkulären Geschäftsmodellen.

Abbildung 41: Kombinierte Betrachtungsweise aus SD- und GM-Analyse
© 2025 TU Wien



Die Integration beider Mapping-Ansätze schafft einen ganzheitlichen Rahmen, der nichtlineare Prozesse, Systemgrenzen und Geschäftsaktivitäten miteinander verbindet. Dies ermöglicht ein erweitertes Geschäftsmodell-Mapping, das aktuelle Herausforderungen adressiert, indem es lineare Prozesse in ein zirkuläres Wertschöpfungsnetzwerk überführt. Der multidirektionale Ansatz berücksichtigt ökonomische, ökologische und soziale Perspektiven und fördert den Übergang zur Kreislaufwirtschaft auf System-, Prozess- und Elementebene. Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen verknüpft er gesellschaftliche und wirtschaftliche Ziele mit messbaren Wechselwirkungen, die über das Gebäude als Ressource hinausgehen. Die erweiterte Business Canvas integriert diese Ansätze in ein Kreislaufwirtschaftssystem („Büssings Canvas“). Rote Pfeile und Markierungen verdeutlichen Wechselwirkungen zwischen System-, Prozess- und Geschäftsmodellen sowie die Einbindung systemischer Erkenntnisse (z. B. Engpässe, Rückkopplungen) in die strategische Entwicklung. Externe Einflüsse und Ressourcen werden systematisch verknüpft, um Geschäftsmodelle in die Kreislaufwirtschaft zu integrieren. Die Grafik zeigt eine methodische Herangehensweise, die dynamische Systemanalysen mit transformierten Geschäftsmodellen kombiniert, um ein tieferes Verständnis und die Umsetzung zirkulärer Wertschöpfung in der Realwirtschaft zu ermöglichen.

5. Zusammenführung System Dynamics und Business Models: Im Rahmen der ESPR wurden Anforderungen an das DPP-System und die dazugehörige Infrastruktur formuliert. Diesen wurden

Schlüsselprinzipien, die die Integrität, Transparenz und Sicherheit von digitalen Systemen gewährleisten sollen gegenübergestellt, um zu ermitteln, ob die BC-Technologie den Anforderungen der ESPR in allen Bereichen gerecht werden kann (s. Abb. 42).

Abbildung 42: Schlüsselprinzipien der BC-Technologie in Relation zu Anforderungen der ESPR
© 2025 TU Wien

Is blockchain technology the best choice to implement the requirements of the ESPR?	Properties of public blockchains																
	Immutability	Transparency	Record of Changes	Traceability	Trusted Time-Stamping	Visual Evidence	Trust	Accountability	Single-Source of Truth	Automated Transactions	Digital Contracts	Documentation	Process Management	Process Transparency	Collaboration & Communication	Standardized Processes	Enforceable
Requirements for the dpp system																	
persistent unique product identifier	✓	?	?						?								
free of charge		✓															
easy access		?															
specific access rights										X							
back-up copy of the DPP through a digital product passport service provider										X							
fully interoperable with other digital product passports										X							
stored by the economic operator responsible										X							
a new dpp shall be linked to the original dpp or dpps										?							
dpp remains available after a cessation of activity of the economic operator										?							
high level of security is ensured																	
high level of privacy is ensured										X							
fraud is avoided	✓							✓									
service providers shall not sell, reuse or process such data										X							
Requirements for data in the digital product passport																	
The data in the digital product passport shall be accurate										?							
The data in the digital product passport shall be complete										X							
The data in the digital product passport shall be up to date										X							
all data included in the dpp shall be based on open standards										X							
the dpp shall be fully interoperable with other dpps										X							
all data included in the dpp shall be machine-readable										X							
all data included in the dpp shall be structured										X							
all data included in the dpp shall be searchable										X							
all data included in the dpp shall be without vendor lock-in										X							
established at model, batch or item level										X							
rights to modify data shall be restricted based on the access rights										X							
data authentication shall be ensured										X							
data reliability shall be ensured										X							
data integrity shall be ensured	✓	✓						✓		✓							
Requirements for the digital product passport registry																	
stores in a secure manner at least the unique identifiers										X							
enables verification of the authenticity of the digital product passport										X							
avoids a disproportionate administrative burden										X							
Requirements for the digital product passport webportal																	
publicly accessible web portal										X							
guarantee that stakeholders can search for and compare the data										X							
consistent with their respective access rights										X							

5.9. Einpassung in das Programm „Stadt der Zukunft“

DiCYCLE ist dem Ausschreibungsschwerpunkt: „Digitales Planen, Bauen und Betreiben, Subthema: 1.2 Systemintegration und –kombination von Digitalem Planen, Bauen und Betreiben zuzuordnen. Die im Rahmen des Projektes bearbeiteten Themengebiete sind den folgenden „Leitlinien Digitalen Planens, Bauens und Betriebens für die klimaneutrale Stadt“ des Technologieprogramms „Stadt der Zukunft“ zuzuordnen:

Open BIM: durch die Erforschung möglicher Technologien und Austauschformate für Daten und Informationen aus Planung, Bau und Betrieb.

Interoperabilität von Bauwerksmodellen und Softwarelösungen: durch die Untersuchung von Verknüpfungsmöglichkeiten „digitaler Inseln“ der Bauwirtschaft.

Digitalisierung entlang des Lebenszyklus: aufgrund der Betrachtung potenzieller Möglichkeiten zur Herstellung durchgängiger digitaler Datenketten über den gesamten Lebenszyklus von Baustoffen und Bauelementen bis hin zum E-o-L, mit Fokus auf CE-GMs, um die Ressourceneffizienz und Produktivität im Planen, Bauen, Betreiben und Rückbauen von Gebäuden zu erhöhen.

Stärkung heimischer KMU und Start-ups: indem Möglichkeiten für einen wirtschaftlichen, effizienten und sicheren Datenaustausch zwischen allen Beteiligten der Wertschöpfungskette untersucht wurden.

Internationale Anschlussfähigkeit: mit dem Fokus auf Prozesse und Geschäftsmodelle der Kreislaufwirtschaft wird ein aktueller Lösungsansatz für eine resiliente und nachhaltige Bauwirtschaft verfolgt, der auch im DACH-Raum und auf Ebene der EU intensiv vorangetrieben wird.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde mit dem Framework DiCYCLE ein dezentrales, vertrauenswürdiges Tool für Prozessmanagement im Baubereich entwickelt. Dieses adressiert zentrale Herausforderungen im Umgang mit sensiblen Prozessdaten und der Sicherstellung von Datenintegrität – insbesondere im Kontext der Wiederverwendung und des Recyclings von Baumaterialien. Das entwickelte System leistet einen wesentlichen Beitrag zur Zielerreichung des Programms „Stadt der Zukunft“, indem es zeigt, wie digitale Technologien als Grundlage für transparente, nachhaltige und ressourcenschonende Prozesse eingesetzt werden können.

5.10. Beitrag des Projekts zu den Gesamtzielen des Programms

Die Funktionsweise des Frameworks wurde anhand zweier Use Cases praktisch demonstriert:

- Refurbishment von Parkettböden: In diesem Szenario wurde der Materialfluss von ausgebautem Parkett entlang der gesamten Wertschöpfungskette nachvollziehbar dokumentiert – vom Ausbau in Bestandsgebäuden über die Wiederaufbereitung in der Industrie bis hin zum Verkauf an den neuen Nutzer. Dabei kam eine Regel zur Anwendung, wonach die verfügbare Parkettfläche in jedem Prozessschritt höchstens gleichbleiben, aber nicht größer werden darf. So kann beispielsweise berücksichtigt werden, dass beim Ausbau

Schäden entstehen und somit weniger Material zur Wiederverwendung zur Verfügung steht als ursprünglich geplant. Diese Regel wurde mithilfe von Zero-Knowledge Proofs abgesichert. Dadurch kann ein potenzielles „Greenwashing“ – also das Fälschen von Nachhaltigkeitsnachweisen – wirksam verhindert werden.

- Use Case Recycling von Beton: Dieser Anwendungsfall untersuchte die Rückführung von Betonbruch in den Wertstoffkreislauf. Ziel war es, für alle Beteiligten entlang der Kette – vom Rückbauunternehmen bis zum neuen Einsatz des Materials – nachvollziehbar zu machen, dass nur ordnungsgemäßes und zertifiziertes Material verwendet wurde. Beispiele für überprüfbare Prozessregeln sind etwa, dass nur autorisierte Betriebe den Betonbruch übernehmen dürfen oder dass eine bestimmte Materialmenge vollständig abtransportiert wird. Auch hier ermöglicht das Framework die Validierung solcher Regeln, ohne sensible Prozessdaten offenlegen zu müssen.

6 Schlussfolgerungen

6.1. Gewonnene Erkenntnisse für das Projektteam

Im Rahmen des Projekts konnten zentrale Erkenntnisse zur Anwendbarkeit und zum Potenzial von Zero-Knowledge Proofs (ZKPs) im Bereich der digitalen Prozessabsicherung im Baubereich gewonnen werden. Aus fachlicher Sicht zeigte sich, dass diese Technologie einen vielversprechenden Beitrag leisten kann, um unternehmerische Compliance nachweisbar zu machen – also etwa die Einhaltung von Umweltauflagen oder Prozessregeln – ohne dabei sensible Geschäftsdaten offenzulegen. Dadurch entsteht die Möglichkeit, Prozesse nachvollziehbar zu dokumentieren und dennoch Datenschutz und Betriebsgeheimnisse zu wahren. Besonders hervorzuheben ist dabei, dass diese Beweise öffentlich auf Blockchains gespeichert werden können, wodurch ein hohes Maß an Transparenz und Vertrauenswürdigkeit geschaffen wird.

Gleichzeitig wurde im Projekt deutlich, dass der Einsatz dieser Technologien auch mit einer gewissen Komplexität verbunden ist. Die im Projekt entwickelte Lösung wurde als funktionsfähiger Prototyp realisiert, bedarf jedoch weiterer technischer Entwicklung, um eine Produktreife zu erreichen. Dies betrifft unter anderem die Benutzerfreundlichkeit, die Integration in bestehende IT-Systeme sowie die Performance bei Anwendungen in Industriemaßstab.

Eine weitere wichtige Erkenntnis betrifft die Abgrenzung zum Status quo: In Bereichen wie dem Recycling von Baurestmassen existieren in Österreich bereits etablierte Systeme wie das EDM-Portal des BMK, die ähnliche Kontrollfunktionen anbieten. Aufgrund der hohen IT-Sicherheitsstandards dieses staatlich betriebenen Systems ist der Mehrwert einer zusätzlichen Blockchain-Lösung in solchen Fällen begrenzt. Anders stellt sich die Lage jedoch in jenen Anwendungsbereichen dar, in denen der Gesetzgeber keine eigene IT-Infrastruktur bereitstellt, sondern die Umsetzung bestimmter Nachweispflichten der Wirtschaft überträgt. In solchen Fällen könnte das Framework DiCYCLE – in Verbindung mit klar definierten technischen Vorgaben – eine tragfähige Lösung darstellen, um eine sichere und überprüfbare digitale Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten.

Ein weiteres zukunftsrelevantes Thema, das sich im Projektverlauf abgezeichnet hat, ist die Einführung digitaler Produktpässe (DPPs) auf europäischer Ebene, die ab 2027 schrittweise verpflichtend werden. Diese Entwicklung eröffnet ein neues Anwendungsfeld für Blockchain-basierte Nachweise, etwa bei der Dokumentation von Materialeigenschaften, Recyclingquoten oder Umweltauswirkungen von Produkten. Insbesondere im Bereich des Bauens und Recyclings könnte das Framework DiCYCLE hier als unterstützende Infrastruktur dienen – entweder ergänzend zu bestehenden Systemen oder für bislang unregelte Prozesse.

6.2. Wie arbeitet das Projektteam mit den erarbeiteten Ergebnissen weiter?

Das Projektteam plant, die gewonnenen Erkenntnisse in zukünftigen Forschungsprojekten weiterzuentwickeln, insbesondere im Kontext digitaler Produktpässe und innovativer digitaler

Geschäftsmodelle. Ziel ist es, die Rolle von Blockchain-Technologien bei der digitalen Absicherung solcher Nachweissysteme weiter zu erforschen und auch anwendungsnah zu testen.

Ein weiterer Fokus liegt auf der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit den Vor- und Nachteilen von Blockchain-Lösungen im Vergleich zu konventionellen IT-Systemen. Im Projekt wurde hierzu ein Kriterienkatalog erarbeitet, mit dem Entscheidungsträger besser einschätzen können, wann der Einsatz von Blockchain tatsächlich sinnvoll ist. Die Vertiefung dieser Fragestellung sowie die Publikation der Ergebnisse in wissenschaftlichen Beiträgen ist auch über das Projektende hinaus geplant.

6.3. Für welche Zielgruppen sind die Projektergebnisse relevant und interessant und wer kann damit wie weiterarbeiten?

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes DiCYCLE sind für alle, an der Wertschöpfung im Rahmen einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft, beteiligten Stakeholder von Relevanz. Das entwickelte Framework hat das Potential als Fundament für eine effiziente, werthaltige und transparente Gestaltung der zugrundeliegenden Prozesse zu dienen. Durch den holistischen Ansatz, der im Rahmen des Projektes durchgeführten Untersuchungen, können die wirkmächtigsten Stellschrauben für eine erfolgreiche Implementierung kreislaufwirtschaftlicher Grundsätze in bestehende und zukünftige Geschäftsmodelle identifiziert werden. Die untersuchten Testfälle können, auf Grundlage der Ergebnisse der Projekte BIMd.sign und FMChain, Möglichkeiten und Grenzen für den sinnvollen Einsatz von BC und SC vor, während und nach dem Bauprozess aufzeigen. So wird gezeigt, wo der Einsatz dieser Technologien sinnvoll ist, mit welchen Hindernissen zu rechnen ist und in welchen Bereichen andere Lösungen zu bevorzugen sind, um verlässliche E-o-L Prädiktionen treffen zu können. Die Betrachtung der untersuchten Prozesse mit Hilfe der Methodik der System Dynamics zeigt wie vielfältig und kleinteilig, entscheidende Einflussfaktoren innerhalb des Wertschöpfungsnetzwerks sein können und gibt somit Anlass diesen mehr Aufmerksamkeit zukommen zu lassen, um Wettbewerbsvorteile zu sichern. Die Untersuchung der Use Cases unter Zuhilfenahme des im Rahmen des Projektes entwickelten Business Model Canvas macht deutlich wie sehr sich kreislaufwirtschaftlich und linearwirtschaftlich orientierte Geschäftsmodelle unterscheiden und welche ökonomischen Vorteile die Kreislaufwirtschaft in naher Zukunft bieten könnte. Diese Ergebnisse erlangen besondere Bedeutung vor dem Hintergrund der EU-weiten Einführung des Digitalen Produktpasses, die in den nächsten Jahren sukzessive umgesetzt wird, denn sie geben klare Hinweise darauf welche Technologien sinnvoll zum Einsatz kommen können, welche Granularität bei der Betrachtung der zu dokumentierenden Prozesse notwendig ist und welche neuen und bestehenden Geschäftsmodelle sich diese Ergebnisse zunutze machen können. Die so gewonnenen Erkenntnisse stellen eine fundamentierte Entscheidungshilfe für politische und wirtschaftliche Entscheidungsträger dar.

6.4. Bitte beschreiben Sie ggf. mögliche rechtlichen Hürden, welche in Zusammenhang mit den ausgearbeiteten Konzepten bzw. Technologien bestehen.

Im Projekt selbst wurde keine detaillierte rechtliche Analyse durchgeführt. Aus technischer Sicht wurde jedoch deutlich, dass einige rechtliche Fragestellungen derzeit noch nicht abschließend geklärt sind. Dies betrifft etwa die Rechtsverbindlichkeit von Zero-Knowledge Proofs: Ähnlich wie digitale

Signaturen zunächst keine rechtliche Gleichstellung mit händischen Unterschriften hatten, könnte es auch bei ZKPs einer gesetzlichen Klarstellung oder Anpassung bedürfen, damit deren Ergebnisse rechtlich als Beweis anerkannt werden.

Auch im Hinblick auf den Datenschutz (DSGVO) ist eine genauere Prüfung notwendig. Zwar werden mit Zero-Knowledge Proofs keine sensiblen Inhalte preisgegeben, jedoch können bestimmte Metadaten, wie etwa Zeitstempel, potenziell Rückschlüsse auf Beteiligte oder Abläufe zulassen. Um dem entgegenzuwirken, wurde im Projekt eine Funktion entwickelt, die es erlaubt, zusätzliche Metadaten zu erzeugen, welche Dritte nicht von den echten Metadaten unterschieden werden können und dadurch Rückschlüsse auf die Prozesse verhindert. Dieser Ansatz wird in zukünftigen Umsetzungen weiter verfeinert werden.

6.5. Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten

Die bisherigen wissenschaftlichen Verwertungs-/Weiterverbreitungsaktivitäten umfassten zahlreiche Vorträge bei nationalen und internationalen Veranstaltungen, Vorträge für die Industrie und bei Weiterbildungsseminaren, sowie Publikationen in Fach- und wissenschaftlichen Journals. Die Liste der Beiträge, welche durch DiCYCLE entstanden sind, sind im Folgenden aufgelistet.

TU Wien- Integrale Planung und Industriebau

- Teilnahme und Präsentation an der *15th International Conference Organization, Technology and Management in Construction 2022 (OTMC 2022)*. Croatian Association for Construction Management and Croatian Association for Project Management, mit paper: Sibenik, G., Schützenhofer, S., & Sreckovic, M. (2022). Digitalizing Building's End-of-Life. <https://doi.org/10.34726/2721>
- Teilnahme und Präsentation an der *European Conference on Computing in Construction (EC3 2022)*, Rhodes, Greece, mit paper: Sreckovic, M., Sibenik, G., Schützenhofer, S., Kovacic, I., Preindl, T., & Kastner, W. (2022). DiCYCLE: Rethinking the buildings' end-of-life. In L. C. Tagliabue, A. Chassiakos, D. M. Hall, D. Nikolic, & R. Soman (Eds.), *Conference Proceedings of the European Conference on Computing in Construction EC3 2022* (pp. 61–67). Università degli Studi di Torino. <https://doi.org/10.35490/EC3.2022.225>
- Einladung und Teilnahme von IBAU. an Podiumsdiskussion im Rahmen der circularXchange (12-15.10.2022), **organisiert von Projektpartner Materialnomaden (MNO)**, Wien, <https://www.materialnomaden.at/process/circularxchange/>
- Teilnahme und Präsentation an der *14th European Conference on Product and Process Modelling 2022 (ECPPM 2022)*, Trondheim, Norwegen, mit paper: Sreckovic, M., & Sibenik, G. (2023). *Designing the business model for the end-of-life phase*. In E. Hjelseth, S. Sujana, & R. Scherer (Eds.), *14th European Conference on Product and Process Modelling - Abstract Booklet*. ISBN: 978-1-032-40673-2
- Teilnahme und Präsentation an der *17th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES 2022)*, Paphos, Zypern, mit Beitrag: Sreckovic, M., Schützenhofer, S., Sibenik, G. & Kotecki, A. (2022). Streams of Reuse of Building Elements: Case Study Analysis
- Teilnahme als eingeladene Vortragende in der "Computing in Construction Summer School", im Rahmen der **European Conference on Computing in Construction (EC3 2023)**, zum Thema Blockchain and Building Life Cycle, 4.-8.7.2023, Heraklion, Griechenland

- Teilnahme und Präsentation an *18th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES)* 24.9-29.9.2023, Dubrovnik, Kroatien, mit dem paper: *BRIDGING THEORY AND PRACTICE: STAKEHOLDER INSIGHTS ON CIRCULAR ECONOMY IN THE BUILDING LIFE CYCLE*; M. Srećković*, D. Hartmann, S. Schützenhofer, A.Kotecki; Einladung für die Special Issue im Journal *Energy Reports* (derzeit im Review-Process)
- Teilnahme und Präsentation an *4th Construction Blockchain Conference (CBC 2023) - IoT, Blockchain, and Smart Environments* - Hong Kong ONLINE, 6.-8.11.2023, M. Sreckovic als eingeladener Keynote Speaker mit Session Keynote: *Reconsidering Processes in the Building Life Cycle using Blockchain*
- Paper zu Blockchain: Li, J., Kifokeris, D., Barati, M., Calis, G., Gledson, B., Hall, D., Hunhevicz, J., Kassem, M., Msawil, M. & Srećković, M. (2023). *HUMAN-DATA INTERACTION (HDI) AND BLOCKCHAIN: AN EXPLORATION OF THE OPEN RESEARCH CHALLENGES FOR THE CONSTRUCTION COMMUNITY*. Proceedings of the European Conference on Computing in Construction; [10.35490/EC3.2023.263](https://doi.org/10.35490/EC3.2023.263)
- Einreichung paper *Blockchain (De)-Centralization and Network Governance*, M. Sreckovic & J. Windsperger in Journal of Operations Management, **Special Issue on Operational Perspectives on Blockchain Applications** (derzeit im Review Process)
- Vorstellung Projekt DiCYCLE im Rahmen Austauschtermin - Möglichkeiten zur Zusammenarbeit im Rahmen von EU Projekt Reincarnate, mit Stadt Wien, Stabsstelle Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit im Bauwesen (SRN), 5.12.2023
- Abschluss Diplomarbeit: Kotecki, A. (2023). *Wiederverwendung im Bauwesen: Analyse der Kriterien für eine Implementierung mit Bestandselementen* [Diploma Thesis, Technische Universität Wien]. [repositUm. https://doi.org/10.34726/hss.2023.113040](https://doi.org/10.34726/hss.2023.113040)
- Wissenschaftliche Publikation: Sreckovic, M., Hartmann, D., Schützenhofer, S., & Kotecki, A. (2024). **Bridging theory and practice: Stakeholder insights on circular economy in the building life cycle**. *Energy Reports*, 12, 3291–3301. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.09.014>
- Tagungsbandherausgabe: Sreckovic, M., Kassem, M., Soman, R., & Chassiakos, A. (Eds.). (2024). *Proceedings of the 2024 European Conference on Computing in Construction*. <https://doi.org/10.35490/EC3.2024>
- Teilnahme und Präsentation an *19th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES)* 8.9-12.9.2024, Rome, Italien mit dem paper: *CONSTRUCTION METHOD CHOICE AND ASSOCIATED ECONOMIC EFFICIENCY INTERACTION FOR CIRCULAR* M. Srećković*, A. Crudici;
- Teilnahme mit Präsentation **2024 European Conference on Computing in Construction**, Chania, Crete, Greece July 14-17, 2024 und Publikation im Tagungsband: Sreckovic, M., Hartmann, D., Preindl, T., Kjær, M., Kessler, A., & Kneidinger, M. (2024). *Blockchain Supported Closed Loop in Circular Economy*. In *Proceedings of the 2024 European Conference on Computing in Construction* (pp. 82–89). <https://doi.org/10.35490/EC3.2024.321>
- Teilnahme und Präsentation an **2024 International System Dynamics Conference**, 4-8.8.2024, Bergen, Norway mit paper und Poster: D. Hartmann, M. Sreckovic, *From Linear to Circular: A Holistic Framework for Sustainable Transition in the AEC Sector*
- Abschluss Diplomarbeit: Crudici, A. (2024). **Zu.Rückbauen : Prozessgestaltung von Kreislaufwirtschaft im Bauwesen** [Diploma Thesis, Technische Universität Wien]. [repositUm. https://doi.org/10.34726/hss.2024.124588](https://doi.org/10.34726/hss.2024.124588)

- Abschluss Diplomarbeit: Wurdinger, B. (2024). **Tokenisierung von Immobilien in der Projektentwicklung** [Diploma Thesis, Technische Universität Wien]. repositUM. <https://doi.org/10.34726/hss.2024.111265>

TU Wien – Automation Systems Group

- Teilnahme und Präsentation an der *2nd Conference Of The Austrian Blockchain Center Wien*, mit Präsentation: Preindl, T. (2022). Ensuring Process Compliance and Data Provenance in the Building Life Cycle.
- Teilnahme und Präsentation an der **2023 IEEE 20th International Conference on Software Architecture (ICSA 2023)**, L'Aquila, Italien, mit paper: Kjær, M. (2023). Analyzing the Use of Blockchains for Challenges in Inter-organizational Business Processes. In *2023 IEEE 20th International Conference on Software Architecture Companion (ICSA-C)* (pp. 137-140) <https://doi.org/10.1109/ICSA-C57050.2023.00039>
- Teilnahme und Präsentation an der **21st International Conference on Business Process Management (BPM 2023)**, Utrecht, Niederlande, mit paper: Kjær, M., Preindl, T., Kastner, W. (2023). Towards an Understanding of Trade-Offs Between Blockchain and Alternative Technologies for Inter-organizational Business Process Enactment. In: Köpke, J., et al. *Business Process Management: Blockchain, Robotic Process Automation and Educators Forum. BPM 2023. Lecture Notes in Business Information Processing*, vol 491. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43433-4_3
- Abschluss Diplomarbeit: Kleebinder, D. (2022). *Time-travelling state machines for verifiable BPM* [Diploma Thesis, Technische Universität Wien]. repositUM. <https://doi.org/10.34726/hss.2023.99122>
- Abschluss Diplomarbeit: Navratil, A. (2023). *Distributed off-chain storage for inter-organizational business process execution* [Diploma Thesis, Technische Universität Wien]. repositUM. <https://doi.org/10.34726/hss.2023.105744>
- Abschluss Diplomarbeit: Lielacher, T. (2023). *Towards Compliance-By-Design for a Decentralized Business Process Execution Engine* [Diploma Thesis, Technische Universität Wien]. repositUM. <https://doi.org/10.34726/hss.2023.99123>
- Teilnahme und Präsentation mit Paper „*Interpreted and Confidential Execution of Process Choreographies on a Blockchain*“ an **22nd International Conference on Business Process Management (BPM)** in Krakau, Polen, 1.-6.9 2024.
- Teilnahme und Präsentation mit Paper „*Business in the Age of Platform Economics: Managing Decentralised Business Processes Beyond Blockchain*“ mit Kollegen der TU München an **22nd International Conference on Business Process Management (BPM)** in Krakau, Polen, 1.-6.9 2024.
- Abgeschlossene Diplomarbeit: Oskar Petto hat seine Arbeit zum Thema “Using zero-knowledge proofs for the confidential execution of collaborative business processes on blockchain” verfasst.

FPB (Forschen, Planen, Bauen)

- 28.03.2023, 10:00-14:00 Uhr, Vortrag: *Konzept Social Urban Mining, Re-Use von Bauteilen, Wirkung und Beispiele*, Circular Brunch **Cyrkl**, Haus der Industrie, Wien

- 10.05.2023 Blockvorlesung Montanuniversität Leoben: *Zirkuläre Architektur*, LV **Recyclinggerechte Produktgestaltung und Ecodesign** (4 UE), Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW), Leoben
- 22.06.2023, 13:00-15:00 Uhr Workshop: Digital Findet Stadt: **Kreislauffähiges Sanieren, Workshop 3: Bestandsbewertung**, Vorstellung und Systematik für Rückbauplanung nach DiCYCLE (2 h), Büro Drees & Sommer, Wien
- 06.10.2023, Vortrag: „Zirkularität und Klimaschutz im Holzbau, eine kritische Betrachtung“ (1h), Symposium **Zirkuläres Bauen mit Holz** zu den Themen: Kreislaufwirtschaft, Wiederverwendung von Bauteilen, Lösbare Verbindungen, Bauteildepot: TU Graz Institut für Architekturtechnologie
- 11.10.2023, Vortrag: **Construction Goes Circular Conference**, “Circularity - from urbanism to construction”, Lahti, Finnland, <https://www.constructiongoescircular.com/>
- 19.10.2023, Workshop zum Thema **Verankerung der Kreislaufwirtschaft in der Aus- und Weiterbildung im Bausektor**, 13:00-17:00 Uhr im Climate Lab, Wien
- 08.11.2023 Vortrag: *Future Convent*, HTL-Schüler Convention in Gmunden, Congresshalle, <https://www.futureconvent.at/index.php/gmunden>
- 07.12.2023 (8 UE) Digital Findet Stadt: **Unterrichtsmodul zur Kreislaufwirtschaft Modul 4**, Bauweisen und Bautechnik, Digital Akademie Wien, Vorstellung und Systematik Rückbauplanung nach DiCYCLE, <https://www.digitalakademie.at/seminare/kreislauffaehiges-planen-und-bauen>

Vorträge/Dissemination

- 25.01.2024 (8 UE) Digital Findet Stadt: **Unterrichtsmodul zur Kreislaufwirtschaft Modul 4**, Bauweisen und Bautechnik, Digital Akademie Wien, Vorstellung und Systematik Rückbauplanung nach DiCYCLE, <https://www.digitalakademie.at/seminare/kreislauffaehiges-planen-und-bauen>
- 16.05.2024 (8 UE) Digital Findet Stadt: **Unterrichtsmodul zur Kreislaufwirtschaft Modul 4**, Bauweisen und Bautechnik, Digital Akademie Wien, Vorstellung und Systematik Rückbauplanung nach DiCYCLE, <https://www.digitalakademie.at/seminare/kreislauffaehiges-planen-und-bauen>
- 03.10.2024 (8 UE) Digital Findet Stadt: **Unterrichtsmodul zur Kreislaufwirtschaft Modul 4**, Bauweisen und Bautechnik, Digital Akademie Wien, Vorstellung und Systematik Rückbauplanung nach DiCYCLE, <https://www.digitalakademie.at/seminare/kreislauffaehiges-planen-und-bauen>

MNO (Materialnomaden)

Teilnahme/ Präsentation an folgenden Veranstaltungen:

- 29.11.2023 / OFFcity (Pardubice, CZ) / Circulaqr Design & Architecture
- 10.10.2023 / European Culture& Creativity Days Vienna (Angewandte) / Next Materials
- 7.10.2023 / Festival zur Entwicklung der Zukunft (Campus Väre, Dornbirn) / Organisationsmodelle einer Kreislaufwirtschaft
- 29.9.2023 / VIENNA DESIGN WEEK / Der neue Wiener Kreis (circularHUB.vienna)
- 23.11.2023 Digital findet Stadt - Digitalakademie zum Thema kreislauffähiges Design
- 22.11.2023 / Kunstuni Linz – Industrial Design & Base Habitat / re:use und circular Design in der Baukultur
- 20.10.2023 / Nachhaltigkeitsforum Semper Depot / ReParkett

- 14.6.2023 / Symposium_Circular-Potentials (Wirtschaftsagentur) / Kreislaufwirtschaft - Urban Mining und
- Kollaboration
- 11.5.2023 / Donauuniversität Krems / Building Innovation- Kreislaufwirtschaft / C2C Inspired Projects
- 4.5.2023 / Wiener Sanierungstage (OFI) / re:use
- 14.-18.3.2023 / Messe Wohnen&Interieur / ReParkett & Re:Products Wiener Sanierungstage
- Publikation in: Koren, Paul. 2024 „Die Hausrecycler. Andrea Kessler und Peter Kneidinger verbauen Überreste alter Gebäude in neuen Häusern. Kann so Kreislaufwirtschaft am Bau funktionieren?“, in: DATUM 04/2024, S.50ff.
- ÖGUT-Umweltpreis 2024 TimberLoop | Holzforschung Austria & materialnomaden gmbh als Projektpartner
- Teilnahme an: circular[X]change. 5 commitments. cxc-europe.eu; European network of professionals committed to rethinking how we use and reuse our buildings and materials. 16-18.5.2024 Lendager, Kopenhagen
- Vorträge/Workshops:
 - „Zirkuläres Bauen – re-use salonfähig machen“. OÖ Umweltkongress 15/10/2024, „Zurück in die Zukunft - Circular Society: mehr als ein ökologischer Perspektivenwechsel“ Ursulinenhof, Linz
 - „Zirkuläres Design & ReProducts für unsere Baukultur: Best Practices aus OÖ“ Land in Sicht - Brachflächen in OÖ nutzen, Symposium & Preisverleihung #upperRegion Awards, 20/11/2024 Business Upper Austria – OÖ Wirtschaftsagentur GmbH, last, Linz
 - „Bauteilvermittlung im europäischen Vergleich – Bauteilbörsen als Werkzeug für circular design & architecture?“ Fachgespräch: Circular Heritage. Kreislauffähiges Sanieren mit traditionellen Bauweisen, 10/12/2024 Bundesdenkmalamt, Verein zur Förderung der Baudenkmalpflege Kartause Mauerbach
 - materialnomaden gmbh / circular house gmbh, Vortrag Andrea Kessler. „Projekt LENA“ Second Hand als Bautrend? Zirkuläres Bauen mit Holz, 15/02/2024 ProHolz Austria. Dialog Holzbau 2024 Keplersaal, Linz

Ausstellungen/Messen

- Internationale Holzmesse, Holz & Bau, Klagenfurt Messe
- materialnomaden. „ÖBBx materialnomaden / ReParkett & ReProducts.“ DesignDistrict, 04-06/10/2024, Hofburg, Wien
- materialnomaden und BASEhabitat: Offene Baustelle & geführter Rundgang „Wiederverwenden und Weiterbauen in Stadl-Paura“, Architekturtag 2024. Geht's noch?, 07-08/05/2024, LenA, Stadl-Paura, OÖ
- Circular Economy Summit Austria. Walk Of Opportunities „LenA Circular Houses“, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Expedithalle, Wien

Interviews:

- Lang, Mari. 2024. „Spielend und bauend Welten verändern.“ Ö1. Menschenbilder Mittendrin. 21/07/2024
- Konrad, Verena im Interview mit Kessler, Andrea und Kneidinger, Peter „Materialnomaden: Re:use! Planen

AMK (Altmetalle Kranner)

- Beitrag im Newsletter der Wiener Wirtschaft; „Schätze im Schutt“ - WKO.at; 13.3.2023, <https://www.wko.at/wien/news/schaetze-im-schutt>
- Teilnahme an der Veranstaltung des Verbands Österreichischer Entsorgungsbetriebe (VOEB) „Gemeinsam.Kreislauf.Wirtschaften“, November 2023
- Treffen der Arbeitsgemeinschaft Metalle Österreich im VDM in 3500 Krems – 14.03.2024 <https://www.vdm.berlin/gremien/ag-metalle-oesterreich/>
- VOEB Regionaltagung NÖ in 2460 Bruck a.d. Leitha – 11.04.2024 <https://www.voeb.at/>
- AWT des ÖWAV (Abfallwirtschaftstagung) – 24.4. - 25.4.2024 <https://www.oewav.at/>
- Treffen der Arbeitsgemeinschaft Metalle Österreich im VDM in 2500 Baden – 24.09.2024 – im Zuge dieser Veranstaltung wurde Peter Heinrich zum neuen Ausschussleiter der Arbeitsgemeinschaft gewählt <https://www.vdm.berlin/gremien/ag-metalle-oesterreich/>
- VDM Trefftag Süd in München 05.12.2024 <https://www.vdm.berlin/>
- 2x WKO-Sitzung Sekundärrohstoffhandel <https://www.wko.at/oe/handel/sekundaerrohstoffhandel/start>
- 2x WKW-Sitzung Maschinenhandel <https://www.wko.at/oe/handel/maschinen-technologie/start>
- 2x WKW-Veranstaltung Maschinenhandel <https://www.wko.at/oe/handel/maschinen-technologie/start>

Das weitere (Markt-/ Verbreitungs-) Potenzial von DiCYCLE:

Eine direkte wirtschaftliche Verwertung des Frameworks DiCYCLE wurde im Projektverlauf mit dem Partnerunternehmen Materialnomaden diskutiert. Dabei wurde auch der konkrete Use Case „Refurbish“ hinsichtlich seines wirtschaftlichen Potenzials reflektiert. Aufgrund seiner stark spezialisierten Anwendbarkeit (beschränkt auf bestimmte Rückbauprojekte mit Stabparkett) ist eine unmittelbare Markteinführung derzeit nicht geplant.

Langfristig bietet das Framework DiCYCLE ein beachtliches Potenzial: Im Rahmen des FFG-Leitprojekts PACE-DPP sollen Teile des Frameworks auf andere Branchen übertragen und dort in realen Anwendungsfällen getestet werden – insbesondere im Holz- und Elektronikbereich. Die dort gewonnenen Erkenntnisse werden wiederum dazu beitragen, das Framework weiter zu optimieren und mittel- bis langfristig auch im Baubereich breiter einsetzbar zu machen. Die zunehmende Verankerung digitaler Nachweissysteme in EU-Standards unterstreicht dabei die Relevanz und Zukunftsfähigkeit der im Projekt DiCYCLE erarbeiteten Ansätze.

7 Ausblick und Empfehlungen

- **Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten**

Ein zukunftsrelevantes Thema, das sich im Projektverlauf abgezeichnet hat, ist die Einführung digitaler Produktpässe (DPPs) auf europäischer Ebene, die ab 2027 schrittweise verpflichtend werden. Diese Entwicklung eröffnet ein neues Anwendungsfeld für Blockchain-basierte Nachweise, etwa bei der Dokumentation von Materialeigenschaften, Recyclingquoten oder Umweltauswirkungen von Produkten. Insbesondere im Bereich des Bauens und Recyclings könnte das Framework DiCYCLE hier als unterstützende Infrastruktur dienen – entweder ergänzend zu bestehenden Systemen oder für bislang unregelte Prozesse.

Die Ergebnisse aus DiCYCLE wie Immobilien aus Sicht der CE zu bewerten sind, und welche Geschäftsmodelle für die einzelnen Bauteile und Materialien bestehen, kann als Vorlage zur Entwicklung einer Softwarelösung herangezogen werden, welche die derzeit am Markt erhältlichen Lösungen zur Immobilienbewertung und Verwaltung durch materielle und abfallwirtschaftliche Aspekte ergänzt.

Als weitere Entwicklungsarbeit wird die Erweiterung des Leistungsspektrums der Unternehmen angesehen, in dem die im Forschungsvorhaben gewonnen Erkenntnisse und Geschäftsmodelle übernommen und im Unternehmen implementiert werden. Hierzu zählen beispielsweise die digitalisierte und durch SC unterstützte Abwicklung von Prozessen, auf Basis entwickelter Bauteilkataloge die eine rasche Beurteilung und Kundgabe von empfehlungsmaßnahmen im Zuge von Beratungstätigkeiten zu Kreislaufwirtschaftlich-konformer Planung.

- **Potenzial für Demonstrationsvorhaben (Chancen / Herausforderungen / Risiken bei der Realisierung / Umsetzung in Richtung Demonstrationsprojekt)**

Die im Rahmen des Forschungsprojekts entwickelten Konzepte bieten das Potential in Form eines Demonstrationsprojekts pilothaft umgesetzt und weiterentwickelt zu werden. Die Umsetzung von Blockchain und Building Information Modeling (BIM) zur Förderung von Recycling und Wiederverwendung in einem Demonstrationsprojekt im Bauwesen ist ein innovativer Ansatz, der die Digitalisierung und Nachhaltigkeit in der Baubranche miteinander verknüpft. Das Ziel wäre, ein Bauwerk (z. B. ein kleines Gebäude oder eine Modulstruktur) zu planen, zu errichten und am Ende des Lebenszyklus rückzubauen, wobei der Fokus auf der transparenten Nachverfolgung von Baumaterialien liegt. Blockchain und BIM sollen sicherstellen, dass Materialien effizient wiederverwendet oder recycelt werden können, um Abfall zu minimieren und die Kreislaufwirtschaft zu stärken. Ein solches Demonstrationsprojekt würde zeigen, wie Blockchain und BIM die Baubranche nachhaltiger machen können. Es erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Planern, Bauunternehmen, Softwareentwicklern und Recyclingfirmen. Herausforderungen hierbei sind:

- Technische Komplexität: Die Integration von BIM und Blockchain erfordert standardisierte Schnittstellen und geschultes Personal.

- **Kosten:** Die Anfangsinvestitionen für Software, Schulungen und Blockchain-Infrastruktur könnten hoch sein, auch wenn langfristig Einsparungen durch effizientere Materialnutzung entstehen.
- **Akzeptanz:** Kleine Unternehmen könnten zögern, neue Technologien einzuführen, was die Zusammenarbeit erschwert

Chancen:

- **Nachhaltigkeit:** Reduktion von Bauabfällen durch gezielte Wiederverwendung und Recycling.
- **Transparenz:** Ein durch Blockchain gesichertes System, das Vertrauen in die Qualität und Herkunft von Materialien schafft.
- **Skalierbarkeit:** Das Projekt könnte als Blaupause für größere Bauprojekte dienen, insbesondere im öffentlichen Sektor.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kreislaufwirtschaft auf der Baustelle: Abfallvermeidung durch aushubarmes Bauen, Wiederverwendung von Bauteilen und Verwertung von auf der Baustelle gewonnenen Baustoffen © 2018 Romm ZT

Abbildung 2: Framework für Planen/Bauen/Betrieb erweitert um E-o-L © 2022 TU Wien

Abbildung 3: Workflow DiCYCLE © 2022 TU Wien

Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung des Wiederverwendungsprozesses von Baumaterialien und Bauelementen (Kotecki, 2022) © TU Wien

Abbildung 5: Business Model Canvas von Alexander Osterwalder & Yves Pigneur (www.strategyzer.com), lizenziert unter CC BY-SA 3.0

Abbildung 6: Angepasstes Business Model Canvas basierend auf Business Model Canvas (Osterwalder & Pigneur, lizenziert unter CC BY-SA 3.0) und ISO 59010. Weiterentwicklung und visuelle Überarbeitung: TU Wien, 2025

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mengen Abbruchmaterial lt. BIM.....	62
Tabelle 2: Gesamte Massenströme.....	63

Literaturverzeichnis

Abfallverzeichnisverordnung 2020, Verordnung der Bundesministerin für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie über ein Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnisverordnung 2020) StF: BGBl. II Nr. 409/2020 [CELEX-Nr.: 32008L0098].

Akbarieh A, Jayasinghe LB, Waldmann D, Teferle FN. BIM-Based End-of-Lifecycle Decision Making and Digital Deconstruction: Literature Review. *Sustainability*. 2020; 12(7):2670. <https://doi.org/10.3390/su12072670>

Akinade, O.O., Oyedele, L.O., Ajayi, S.O., Bilal, M., Alaka, H.A., Owolabi, H.A. & Arawomo, O.O. 2018. Designing out construction waste using BIM technology: Stakeholders' expectations for industry deployment. *Journal of Cleaner Production* 180: 375-385. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.022>

Austrian Standards. 2014a. *ÖNORM B 3151 - Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode*. Vienna: Austrian Standards Institute.

Austrian Standards. 2014b. *ÖNORM EN ISO 16000-32 - Indoor air Identical (IDT) with ISO*. Vienna: Austrian Standards Institute.

AWG 2002, Österreichisches Parlament 2002, Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002, Bundesgesetz über nachhaltige Abfallwirtschaft

BAWP 2017, Österreichischer BUNDES-ABFALLWIRTSCHAFTSPLAN 2017 TEIL 1

BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. 2022. Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie 2022 (abgerufen 12/2024: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/Kreislaufwirtschaft/strategie.html)

BMLFUW - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. 2002. *AWG - Abfallwirtschaftsgesetz 2002: Gesamte Rechtsvorschrift für Abfallwirtschaftsgesetz 2002*. <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20002086>

- BMLFUW - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. 2016. *Gesamte Rechtsvorschrift für Recycling-Baustoffverordnung (RBV)*.
- BMLFUW - Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. 2022. *Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Jahresabfallbilanzen (Abfallbilanzverordnung)*. <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20006160>
- BMNT - Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. 2017. *Bundes-Abfallwirtschaftsplan (BAWP) 2017*. https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/aws/bundes_awp/bawp2022.html
- Bribián, IZ, Capilla, AV and Usón, AA 2011, 'Life cycle assessment of Building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the co-efficiency improvement potential.', *Building and Environment*, 46 (5), pp. 1133-1140
- Brundtland, G. H., Khalid, M., Agnelli, S., Al-Athel, S., & Chidzero, B. J. N. Y. (1987). *Our common future*. New York, 8.
- Brunner, PH 2011, 'Urban Mining - A Contribution to Reindustrializing the City', *Journal of Industrial Ecology*, 15, pp. 339-341
- buildingSMART (2021) <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/>
- Buterin, V. *Ethereum White Paper*, (2013)
- Carminati, B., Rondanini, C. & Ferrari, E. (2018). Confidential Business Process Execution on Blockchain. In: 2018 IEEE International Conference on Web Services (ICWS). pp. 58–65. 10.1109/ICWS.2018.00015
- Čapko, D., Vukmirović, S. & Nedić, N. (2022). State of the Art of Zero-Knowledge Proofs in Blockchain. 2022 30th Telecommunications Forum (TELFOR). pp. 1-4
- Dul, J. & Hak, T. 2012. *Case study methodology in business research*, London New York, London : New York : Routledge.
- EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98
- EU Green Deal, 2019, MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN EUROPÄISCHEN RAT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN - Der europäische Grüne Deal
- EU RessEff 2014, COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS ON RESOURCE EFFICIENCY OPPORTUNITIES IN THE BUILDING SECTOR
- European Commission (DG ENV). 2011. Service Contract on Management of Construction and Demolition Waste – SR1, Final Report Task 2. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0c9ecefcd07a492e-a7e1-6d355b16dde4>
- EU-Verordnung für das Ökodesign nachhaltiger Produkte (ESPR), Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament (abgerufen 12/2024: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32024R1781>)
- Ganter, M. & Lützkendorf, T., *Information management throughout the life cycle of buildings - basics and new approaches such as blockchain*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, (2019).
- García-Bañuelos, L., Ponomarev, A., Dumas, M. & Weber, I. (2017). Optimized Execution of Business Processes on Blockchain. In: *Business Process Management*. pp. 130–146. Lecture Notes in Computer Science, Springer International Publishing. 10.1007/978-3-319-65000-5_8
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm?. *Journal of cleaner production*, 143, 757-768.
- Giorgi, S., Lavagna, M., Wang, K., Osmani, M., Liu, G., Campioli, A., 2022. Drivers and barriers towards circular economy in the building sector: stakeholder interviews and analysis of five European countries policies and practices. *J. Clean. Prod.* 336, 130395.
- Global Resource Outlook, 2019, GLOBAL RESOURCES OUTLOOK 2019 NATURAL RESOURCES FOR THE FUTURE WE WANT, United Nations – International Resource Panel
- Grilo, A. and Jardim-Goncalves, R. (2010) Value Proposition on Interoperability of BIM and Collaborative Working Environments. *Automation in Construction*, 19, 522-530. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.003>

- Herczeg, M., McKinnon, D., Milios, L., Bakas, I., Klaassens, E., Svatikova, K., & Widerberg, O. (2014). Resource efficiency in the building sector: final report. *European Commission, DG Environment, Rotterdam*.
- Heinrich, M., & Lang, W. (2019). Materials passports–Best practice. Innovative solutions for a transition to a circular economy in the built environment, Munich.
- Ho, O. T.-K., Gajanayake, A. & Iyer-Raniga, U. 2023. Transitioning to a state-wide circular economy: Major stakeholder interviews. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 19(200163).
- Honic, M., Kovacic, I., Rechberger, H., (2019) A. Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP): An Austrian case study. *Journal of cleaner production*, 217, 787-797.
- Honic, M., Kovacic, I., Rechberger, H., 2019 B. Concept for a BIM-based Material Passport for buildings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 225(1).
- Honic, M., Kovacic, I., Sibenik, G., Rechberger, H., 2019 C. Data-and stakeholder management framework for the implementation of BIM-based Material Passports. *Journal of building engineering*, 23, 341-350.
- IBAU - Integrale Bauplanung und Industriebau. 2022a. BIMstocks.
<https://www.industriebau.tuwien.ac.at/forschung/forschungsprojekte/bimstocks/>
- IBAU - Integrale Bauplanung und Industriebau. 2022b. SCI_BIM.
<https://www.industriebau.tuwien.ac.at/forschung/forschungsprojekte/sci-bim/>
- IBO(a), 2018, Leitfaden zur Berechnung des Entsorgungsindikators EI KON für Bauteile und das Entsorgungsindikators EI10 auf Gebäudeebene, Version 2.0, Jänner 2018.
- IBO(b), 2018, Leitfaden zur Berechnung des Oekoindex OI3 für Bauteile und Gebäude, Version 4.0, Oktober 2018.
- ISO 59004:2024, Circular economy — Vocabulary, principles and guidance for implementation
- ISO 59010:2024, Circular economy — Guidance on the transition of business models and value networks
- Kleemann, F., Lederer, J., Aschenbrenner, P., Rechberger, H. & Fellner, J. 2016. A method for determining buildings' material composition prior to demolition. *Building Research and Information* 44(1): 51-62.
<https://doi.org/10.1080/09613218.2014.979029>
- Kotecki, A. (2023). *Wiederverwendung im Bauwesen: Analyse der Kriterien für eine Implementierung mit Bestandselementen* [Diploma Thesis, Technische Universität Wien]. *repositUM*.
<https://doi.org/10.34726/hss.2023.113040>
- Kovacic I., Honic M., Sreckovic M.: "*Digital Platform for Circular Economy in AEC Industry*"; *Engineering Project Organization Journal*, (2020), 9; S. 1 - 16.
- Liu, Jiang, Osmani & Demian, Building information management (bim) and blockchain (bc) for sustainable building design information management framework, *Electronics*, (2019).
- Lokshina, I. V., Michal Greguš, & Thomas, W. L., Application of integrated building information modeling, iot and blockchain technologies in system design of a smart building, *Procedia Computer Science*, (2019).
- López-Pintado, O., García-Bañuelos, L., Dumas, M., Weber, I., & Ponomarev, A. (2019) Caterpillar: A business process execution engine on the Ethereum blockchain 49(7), 1162–1193. 10.1002/spe.2702
- Malmqvist, T., Glaumann, M., Scarpellini, S., Zabalza, I., Aranda, A., Llera, E., & Díaz, S. (2011). Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines. *Energy*, 36(4), 1900-1907.
- Management of CDW in the EU, SERVICE CONTRACT ON MANAGEMENT OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE – SR1, Final Report Task 2
- Marangone, E., Di Ciccio, C. & Weber, I. (2022). Fine-Grained Data Access Control for Collaborative Process Execution on Blockchain. In: *Business Process Management: Blockchain, Robotic Process Automation, and Central and Eastern Europe Forum. BPM 2022. Lecture Notes in Business Information Processing*, vol 459. 10.1007/978-3-031-16168-1_4
- Markova, S., & Rechberger, H. (2011). Entwicklung eines Konzepts zur Förderung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen: Materieller Gebäudepass und Design for Recycling für das Bauwesen. Endbericht. Wien. Technische Universität Wien, pp. I-III.

- Meralli, S. (2020). Privacy-preserving analytics for the securitization market: a zero-knowledge distributed ledger technology application, *Financial Innovation* 6 (7). 10.1186/s40854-020-0172-y
- Meyer, I., Sommer, M., Kratena, K., Tesar, M., & Neubauer, C. (2016). Volkswirtschaftliche Effekte durch Recycling ausgewählter Altstoffe und Abfälle. Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung. In *Recycling und Rohstoffe Band 11*
- Nakamoto, S., *Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system* (2008).
- Nawari, N. O. & Ravindran, S., *Blockchain technologies in bim workflow environment*, *Computing in Civil Engineering* 2019 (2019).
- O’Keeffe S. and Bosche F. (2015) *The Need for Convergence of BIM and 3D Imaging in the Open World*. (eds. Alan Hore, Barry McAuley, Roger West) *CitA BIM Gathering Proceedings 2015*, November 12th -13th 2015, Dublin, Ireland
- Osterwalder, Alexander, & Pigneur, Yves. *Business model generation: a handbook for visionaries, game changers, and challengers*. John Wiley & Sons, 2010.
- ÖNORM B 3151, *Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode*, Ausgabe 2022.05.15, Komitee 157, *Austrian Standards*.
- ÖNORM EN ISO 16000-32, *Innenraumlufverunreinigungen - Teil 32: Untersuchung von Gebäuden auf Schadstoffe (ISO 16000-32:2014)*
- Partala, J., Nguyen, T. H. & Pirttikangas, S. (2020). Non-Interactive Zero-Knowledge for Blockchain: A Survey, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 227945–227961. 10.1109/ACCESS.2020.3046025
- Plandata (2020) https://www.bimpedia.eu/-/1505-uebersicht-bim_begriffe-checkliste
- Potrč Obrecht, T., Röck, M., Hoxha, E., & Passer, A. (2020). BIM and LCA Integration: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 12(14), 5534
- Potting, José & Hekkert, M.P. & Worrell, Ernst & Hanemaaijer, Aldert. (2017). *Circular Economy: Measuring innovation in the product chain*.
- Rosen, A. (2021), *Urban Mining Index – Planungs- und Bewertungsinstrument für zirkuläres Bauen*. *Bauphysik*, 43: 357-365. <https://doi.org/10.1002/bapi.202100035>
- Saghafi, M. D., & Teshnizi, Z. S. H. (2011). Recycling value of building materials in building assessment systems. *Energy and Buildings*, 43(11), 3181-3188.
- Sanchez, B., Rausch, C., & Haas, C. (2019). Deconstruction programming for adaptive reuse of buildings. *Automation in Construction*, 107, 102921.
- Santos, Rúben, Aguiar Costa, António, D. Silvestre, José, Pyl, Lincy (2019) *Integration of LCA and LCC analysis within a BIM-based environment*, *Automation in Construction*, Volume 103, Pages 127-149, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.011>.
- Schanda, I. (2021). *BauKarussell: Mit Social Urban Mining zu einer nachhaltigen, sozialen und zukunftsfähigen Baubranche*. *Österr Wasser- und Abfallw* 73, 49-53.
- Shelden, Dennis R., Pauwels, Pieter, Pishdad-Bozorgi, Pardis, Tang, Shu (2020) “Data standards and data exchange for Construction 4.0” In Anil Sawhney, Mike Riley, Javier Irizarry “Construction 4.0”. London: Routledge.
- Sibenik, G. & Kovacic, I. (2020) *Assessment of model-based data exchange between architectural design and structural analysis*, *Journal of Building Engineering*, Volume 32, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101589>.
- Sibenik, G., Srećković, M. & Radu, A. (2022a) *Modular process patterns in the design phase*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, 175(4): 141-151.
- Sibenik, G., Schützenhofer, S., & Sreckovic, M. (2022b). *Digitalizing Building’s End-of-Life*. In *15th International Conference Organization, Technology and Management in Construction* (pp. 77–87). Croatian Association for Construction Management and Croatian Association for Project Management. <https://doi.org/10.34726/2721>
- Sreckovic, M. & Windsperger, J. (2019) *Decentralized Autonomous Organizations and Network Design in AEC: a conceptual framework*. In: *Advances in ICT in Design, Construction & Management in Architecture*,

- Engineering, Construction and Operations (AECO): Proceedings of the 36th CIB W78 2019 Conference, pp. 842 – 850. ISBN: 9781861354860
- Sreckovic, M., Sibenik, G., Breiðfuß, D., Kastner, W. & Preindl, T. 2020. Analysis of Design Phase Processes with BIM for Blockchain Implementation. Available at <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3577529>
- Sreckovic, M., & Sibenik, G. (2023). Designing the business model for the end-of-life phase. In E. Hjelseth, S. Sujan, & R. Scherer (Eds.), *14th European Conference on Product and Process Modelling - Abstract Booklet*.
- Srećković, M., Hartmann, D., Schützenhofer, S. & Kotecki, A. 2024. Bridging theory and practice: Stakeholder insights on circular economy in the building life cycle. *Energy Reports*, 12: 3291-3301.
- Sreckovic, M., Hartmann, D., Preindl, T., Kjæer, M., Kessler, A., & Kneidinger, M. (2024). Blockchain Supported Closed Loop in Circular Economy. In Proceedings of the 2024 European Conference on Computing in Construction (pp. 82–89). <https://doi.org/10.35490/EC3.2024.321>
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*, Boston, Mass. [u.a.], Boston, Mass. [u.a.]: Irwin McGraw-Hill.
- Suliyanti, W. N., & Sari, R. F., Blockchain-based implementation of building information modeling information using hyperledger composer, Sustainability, (2020).
- Succar, B. & Poirier, E. (2020) Lifecycle information transformation and exchange for delivering and managing digital and physical assets, Automation in Construction, Volume 112, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103090>.
- Szabo, N., Formalizing and securing relationships on public networks, First Monday, (1997).
- Tao X., Das M., Liu Y., Cheng J. C. P. (2021), Distributed common data environment using blockchain and Interplanetary File System for secure BIM-based collaborative design, Automation in Construction, Volume 130, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103851>.
- Vogdt, FU, Schenk, A, Koc, A (2019), Urban Mining, Leitfaden zur Vermeidung nicht recyclingfähiger Bauabfälle bei künftigen kommunalen Hochbauvorhaben, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, ISBN 978-3-7388-0398-3
- Weber, I., Xu, X., Riveret, R., Governatori, G., Ponomarev, A. & Mendling, J. (2016). Untrusted Business Process Monitoring and Execution Using Blockchain. In: Business Process Management, vol. 9850, pp. 329–347. Springer International Publishing. 10.1007/978-3-319-45348-4_19
- WGBC 2016, World Green Building Council, 'Global Status Report', (2016)
- Woodhead, R., Stephenson, P. & Morrey, D. (2018) Digital construction: From point solutions to IoT ecosystem, Automation in Construction, Volume 93, 2018, Pages 35-46, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.004>.
- Wust, K., & Gervais, A., Do you need a blockchain?, 2018 Crypto Valley Conference on Blockchain Technology (CVCBT) (2018).
- Ye, Z., Yin, M., Tang, L., & Jiang, H., Cup-of-water theory: a review on the interaction of bim, iot and blockchain during the whole building lifecycle, Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC) (2018)
- Yin, R. K. 2018. *Case study research and applications: design and methods*, Los Angeles London New Delhi Singapore Washington, DC Melbourne, Los Angeles: London: New Delhi: Singapore: Washington, DC: Melbourne: Sage.
- Zhang, C., Hu, M., Di Maio, F., Sprecher, B., Yang, X., & Tukker, A. (2022). An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. *Science of The Total Environment*, 803, 149892, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149892>.

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AEC	Architecture, Engineering and Construction
AMK	Altmetalle Kranner
AWG	Abfallwirtschaftsgesetz
BC	Blockchain
BCF	BIM Collaboration Format
BDM	Building Data Model
BEM	Building Energy Model
BIM	Building Information Modeling
BM/GM	Geschäftsmodell
BMC	Business Model Canvas
BPMN	Business Process Model and Notation
BRM/CDW	Baurestmassen
CAC	Customer Acquisition Cost
CE	Kreislaufwirtschaft
CEGM/CEBM	Geschäftsmodelle der Kreislaufwirtschaft
CLD	Casual-Loop Diagramm
CLV	Customer Lifetime Value
CPR	Construction Products Regulation (EU-Bauprodukteverordnung)
d. h.	das heißt
DfD	Datenflussdiagramm
DLT	Distributed-Ledger-Technologie

DPP	Digitaler Produktpass
E-o-L	End of Life (Lebenszyklusende)
EDM	Elektronisches Datenmanagement
EPD	Environmental Product Declaration
ERP	Enterprise Resource Planing
ESPR	Ecodesign for Sustainable Products Regulation (Ökodesignverordnung)
EU	Europäische Union
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFG	Forschungsförderungsgesellschaft
FPB	Forschen Planen Bauen
FWF	Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung
GI-REC	Global Initiative for Resource-Efficient Cities
GIS	Geographische Informationssysteme
GM/BM	Geschäftsmodell
IBO	Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie
IBU	Institut für Bauen und Umwelt e.V.
IFC	Industry Foundation Classes
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
ISO	Internationale Organisation für Normung
KPI	Key Performance Indicators
LC	Life-cycle (Lebenszyklus)
LCA	Life-cycle assessment (Ökobilanzierung)
MGP	materieller Gebäudepass
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MNO	Materialnomaden
MVD	Model View Definition
RDF	Resource Description Framework

RHB	Roh-, Hilfs- oder Betriebsstoffe
RMH	mineralische Hochbau-Restmassen
SC	Smart Contract
SD	System Dynamics
TU-ASG	Institute of Computer Engineering der TU Wien
TU-IBAU	Institut für integrale Planung und Industriebau der TU Wien
u. a.	unter anderem
UI	User Interface
z. B.	Zum Beispiel
ZKP	Zero-knowledge proof

9 Anhang

9.1. Data Management Plan (DMP)

1: Datenerstellung und Dokumentation

Die Daten wurden durch die in Kapitel 4 beschriebenen Methoden generiert. Hier zum einen durch das Erstellen von Text, Bild und Spreadsheet Dokumenten, der Analysen als digitale Datensammlungen (doc, xls, jpg, png, pdf); - diese sind alle auf internen TU Rechnern gespeichert. Audio und Videodateien, sowie Transkripte der Interviews und Use Cases werden (wo seitens Interviewpartner gewünscht) anonymisiert dokumentiert. Alle Daten, die für das Projekt ermittelt wurden und weiterverwendet werden, finden nur Anwendung in der Forschung. Die Daten werden auf TU-internen Servern gespeichert und dokumentiert.

2: Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte

Urheberrechte der beteiligten Forschenden sind zu respektieren (Referenzierung und Quellenangaben). Die publizierten Daten sind unter Berücksichtigung der Urheberrechte und IP verfügbar. Der Konsortialvertrag regelt das "First Right of Negotiation and Use" für die potenzielle kommerzielle Weiterentwicklung. Die publizierten Daten stehen zu Forschungszwecken zur Verfügung, jedoch sind die Projektpartner zu kontaktieren. Die Forschungsdaten bleiben das geistige Eigentum der Forschungseinrichtungen, in denen das Projekt durchgeführt wird, insbesondere der TU Wien.

Sensible Daten werden durch Anonymisierung geschützt. Für Use Cases und Interviews ist eine informierte Zustimmung erforderlich, welche zu jeder Nutzerstudie und jedem Interview eingeholt wurde. Alle Aktivitäten werden von den Forschungsethik-Ressourcen der TU Wien unterstützt, insbesondere von ihrem Forschungsethik-Koordinator.

3: Datenspeicherung und -erhalt

Die Daten werden auf TU-internen Servern gespeichert. Während der Forschung stützen wir uns auf die von den Forschungseinrichtungen zur Verfügung gestellten Datenverwaltungs- und Speichermöglichkeiten, wie z. B. die TU Procloud oder TU owncloud. Backups auf externen Speichermedien sind nicht vorgesehen. Die Partner:innen haben Zugriff auf die Daten, die Verwaltung der Daten erfolgt durch den Konsortialführer.

4: Wiederverwendbarkeit der Daten

Sensible Daten werden durch Anonymisierung geschützt. Daten die im Zuge der Expertinneninterviews, Analysen sowie Use Cases generiert wurden, werden entsprechend ethischer, rechtlicher und Sicherheitsaspekte anonymisiert und separat gespeichert. Im Zuge des Forschungsprojekts generierte Daten stehen den Projektpartnern, unter Berücksichtigung der vertraglichen Regelung, zur Verfügung. Auf Anfrage, sofern die Partner:innen dies als möglich sehen, können die Daten für Forschungszwecke zugänglich gemacht werden, dies unter der Berücksichtigung der Urheberrechte der beteiligten Forschenden sind zu respektieren (Referenzierung und Quellenangaben). Daten werden im Zuge von wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht. Unsere wissenschaftlichen Veröffentlichungen werden eine Beschreibung der Daten enthalten. Die Daten werden nach der Veröffentlichung der Forschungsergebnisse in wissenschaftlichen Fachzeitschriften veröffentlicht. Forschungsarbeiten werden in den digitalen Bibliotheken der Zeitschriftenverlage gehostet und in der Regel mit einem digitalen Objektidentifikator (DOI) versehen. Für die Publikation und langfristige Speicherung der entsprechenden Daten nutzen wir das Datenrepository der TU Wien.

