

Energie- und Ressourceneinsparung durch Urban Mining-Ansätze

RESUM

A. Allesch, D. Laner,
C. Roithner, K. Fazeni-Fraisl,
J. Lindorfer, S. Moser,
M. Schwarz

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

14/2019

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Energie- und Ressourceneinsparung durch Urban Mining-Ansätze

RESUM

Astrid Allesch, David Laner, Caroline Roithner
TU Wien, Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement

Karin Fazeni-Fraisl, Johannes Lindorfer, Simon Moser, Markus Schwarz
Energieinstitut an der JKU Linz

Wien, November 2018

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT). 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 von allen betroffenen Bereichen 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 BMVIT publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	10
Abstract	12
1. Ausgangslage.....	15
1.1 Einleitung.....	15
1.2 Ziel des Projektes.....	15
2. Projektinhalt.....	17
2.1 Projektstruktur und Vorgehensweise.....	17
2.2 Desk Research (Urban Mining).....	17
2.3 Fallstudien (Case Studies).....	18
2.4 Stakeholder*innen-Einbindung (Workshops)	19
3. Ergebnisse	20
3.1 Urban Mining: Einleitung	20
3.1.1 Einführung: Urban Mining?	20
3.1.2 Literatur: Urban Mining.....	23
3.1.3 Stand der Technik: Fallstudien	34
3.2 Urban Mining: Fallstudien	41
3.2.1 Fallstudie 1: Photovoltaik.....	41
3.2.2 Fallstudie 2: Erdverlegte Strom- und Telekommunikationsinfrastrukturen	69
3.2.3 Fallstudie 3: Ressourceneffiziente Bewirtschaftung von Gebäuden.....	102
3.3 Urban Mining: Workshops	126
3.3.1 Methode und Ablauf	126
3.3.2 Urban Mining: Definition.....	129
3.3.3 Urban Mining: Hemmnisse und Barrieren	130
3.3.4 Urban Mining: Vision 2050.....	133
3.3.5 Urban Mining: Fahrplan zur Erreichung der „Vision 2050	135
3.3.6 Zentrale Aussagen aus der Stakeholder-Einbindung.....	141
3.4 Urban Mining: Zusammenfassung	141
4. Schlussfolgerungen.....	148
4.1 Anthropogenes Lager: Potenzial	148
4.2 Fallstudien: Herausforderungen und Empfehlungen.....	148
4.2.1 Photovoltaik-Module.....	149
4.2.2 Infrastruktur	149

4.2.3	Hochbau	150
4.3	Urban Mining: Herausforderungen und Empfehlungen	151
5.	Ausblick und Empfehlungen.....	155
6.	Verzeichnisse.....	157
6.1	Abbildungsverzeichnis.....	157
6.2	Tabellenverzeichnis	159
6.3	Literaturverzeichnis.....	160
7.	Anhang	168
7.1	Literatur Review	169
7.2	Fallstudie 1	181
7.3	Fallstudie 2	182
7.4	Fallstudie 3	183

Kurzfassung

Ausgangssituation und Motivation

Urban Mining oder städtischer Bergbau zielt auf die effiziente Rückgewinnung von Materialien aus (langlebigen) Gütern am Ende ihrer Nutzungsdauer ab. Aufgrund des enormen anthropogenen Lagers, das urbane Regionen im Laufe der Zeit aufgebaut haben, kann verstärktes Urban Mining maßgeblich zur Steigerung der Ressourceneffizienz von Städten beitragen – für manche Materialien liegt dieses anthropogene Lager bereits in der Größenordnung wirtschaftlich abbaubarer natürlicher Lagerstätten vor.

Inhalte und Zielsetzungen

Ziel des Projektes ist es, Energie- und Ressourceneinsparungen durch die gezielte Nutzung und Verwertung städtischer Materiallager zu untersuchen und anhand von drei konkreten Fallstudien darzustellen, welchen Beitrag Urban Mining zur Gestaltung ressourcen- und energieeffizienter Kreisläufe leisten kann. Die Fallstudien beziehen sich jeweils auf unterschiedliche Teile des anthropogenen Lagers. Fallstudie 1 behandelt die effiziente Nutzung bzw. Rückgewinnung von Materialien in Photovoltaik-Anlagen, Fallstudie 2 befasst sich mit der lebenszyklus-orientierten Bewirtschaftung von erdverlegten Infrastrukturnetzwerken und Fallstudie 3 bezieht sich auf die ressourceneffiziente Bewirtschaftung von Gebäuden am Ende ihrer Nutzung. Neben den Fallstudien stellt die breite Einbindung von Stakeholder*innen einen zentralen Projektbestandteil dar, der dazu dient, Erfahrungen und Wissen relevanter Expert*innen in das Projekt einzubringen und darauf aufbauend Potentiale, Herausforderungen und Hindernisse für Urban Mining aufzuzeigen.

Methodische Vorgehensweise

Zur Erreichung der Projektziele wurden verschiedene Methoden angewendet: i) kritische Analyse und Auswertung bestehender Arbeiten zum Thema Urban Mining, ii) konkrete Fallstudien, die spezifische quantitative Grundlagen in Bezug auf Energie- und Ressourceneinsparungen durch Urban Mining schaffen (anhand von Materialflussanalysen und Ökobilanzen), sowie iii) strukturierter Austausch- und Diskussionsprozess mit Stakeholder*innen zur Identifikation von Optimierungspotentialen, Barrieren und Strategien.

Resultate und Schlussfolgerungen

Die gesamten anthropogenen Materialbestände können im Durchschnitt mit rund 400 Tonnen pro Einwohner*in abgeschätzt werden, wobei hier eindeutig mineralische Baustoffe das Lager mengenmäßig dominieren. Obwohl die Größe der anthropogenen Materiallager bereits in zahlreichen Studien untersucht wurde, besteht erheblicher Forschungsbedarf, was die Charakterisierung dieser Materiallager in Bezug auf ihre Nutzbarkeit als Rohstoffquelle betrifft.

Diverse äußere Faktoren wie Rechtslage, Markt, Technologien etc. bestimmen die sich ständig verändernden Grenzen zwischen Ressourcen und Reserven und sind damit wichtige Treiber für die Umsetzung von Urban Mining Strategien zur Steigerung der Ressourceneffizienz auf städtischer Ebene. Politische Anreize für Urban Mining und in weiterer Folge die Aufklärung der Gesellschaft in Bezug auf dessen Erfordernis und Potenziale sind ebenso notwendig, wie die Forcierung der Forschung, da diese den Grundstein für erfolgreiches Urban Mining legt. Urban Mining beginnt bei der Erkundung des anthropogenen Lagers, über die Bestimmung der Rückgewinnbarkeit bis hin zur Bewertung der rechtlichen, ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen.

- Photovoltaik-Module werden für die Recyclingbranche aufgrund der stetig gewachsenen Kapazitäten und den durchschnittlichen Nutzungsdauern erst in 10 bis 15 Jahren als Abfallstrom relevant. Dennoch gibt es vielerlei Maßnahmen, die bereits in naher Zukunft umgesetzt werden können und müssen, um ein optimales PV-Recycling in Österreich zu etablieren.
- Materialien in unterirdischen Infrastrukturen stellen aufgrund ihrer Lage besondere Herausforderungen und Chancen für den städtischen Bergbau dar. Eingriffe sind in der Regel mit Ausgrabungsaktivitäten verbunden, die häufig zu Verkehrsbeschränkungen führen und vor allem in städtischen Gebieten hohe Kosten (Planung, Durchführung) verursachen. Daher gilt es, diese Materialien (hauptsächlich Kupfer und Aluminium) durch eine integrierte und lebenszyklusorientierte Infrastrukturbewirtschaftung besser zu nutzen, was ökologische und ökonomische Vorteile mit sich bringt.
- Hochbauten stellen aufgrund der akkumulierten Materialmengen und dem hohen Anteil von Wertstoffen ein relevantes Ressourcenpotential dar, das derzeit nur unzureichend genutzt wird. Vor allem die Erhaltung und Weiternutzung von Gebäudeteilen sowie die Bauteil-Wiederverwendung birgt ein hohes Potential für Energie- und Rohstoffeinsparungen. Generell stellt besonders die detaillierte Planung (inkl. Wertstoffrückgewinnungskonzept) des Rückbaus und seine sorgfältige Durchführung die Basis für eine ressourceneffiziente Bewirtschaftung von Alt-Gebäuden dar.

Ausblick

Als Begriff ist Urban Mining aktuell noch zu unklar definiert bzw. wird er selbst von Expert*innen zu wenig konkret angewandt. Es wird empfohlen, entweder eine Schärfung des öffentlichen Begriffsbilds zu forcieren oder bei der Öffentlichkeitsarbeit und Ähnlichem konkret das gewünschte Teilgebiet anzusprechen. Zusammenfassend können auf Basis dieser Studie folgende Empfehlungen bzw. notwendige zukünftige Arbeiten abgeleitet werden:

- Etablierung von Organisationsstrukturen, die eine Vernetzung der Akteur*innen entlang der Wertschöpfungskette unterstützen (für z.B. Gebäude, Photovoltaik und Infrastruktur).
- Entwicklung von Datenbanken, die das anthropogene Lager in Art und Menge des Rohstoffs verzeichnen sowie eine räumliche Verortung des „Vorkommens“ erlauben (Rohstoffkataster).
- Entwicklung von Konzepten zur modularen Bauweise von Gebäuden, um z.B. die Nutzungsdauer zu verlängern bzw. einzelne Module wiederzuverwenden.
- Entwicklung und Bewertung neuer Geschäftsmodelle für Recycling, Wiederverwendung, Einsatz von Sekundärrohstoffen etc.
- Methode zur Berücksichtigung der Lebenszykluskosten bei Projektkalkulationen – speziell bei öffentlichen Ausschreibungen.
- Untersuchung einzelner Design-for-Recycling-Ansätze in Hinblick auf die Lebensdauer und die Auswirkungen auf die Betriebs- und Nutzungsphase (z.B. mittels Ökobilanzierung).

Abstract

Starting point and Motivation

Urban mining aims to achieve efficient material recovery from (durable) goods at the end of their lifetime. Due to the enormous anthropogenic stocks that urban regions have built up over time, urban mining could make a significant contribution to increase the resource efficiency of cities – above all, for some materials the anthropogenic stocks are already in the range of economically mineable quantities of natural resources.

Contents and Objectives

The objectives of this project are to investigate energy and resource savings using anthropogenic stocks and to quantify potential urban mining concepts to increase resource efficiency based on three case studies. The case studies address different parts of the anthropogenic stock. Case study 1 deals with the efficient use and recovery of photovoltaic modules, case study 2 deals with the life cycle oriented management of underground infrastructure networks and case study 3 refers to the resource-efficient management of buildings at the end of their use phase. In addition to the case studies, stakeholder involvement is essential to the project to highlight potentials and challenges for urban mining on a general level based on expert knowledge and experience.

Methods

Various methods have been used to achieve the project objectives: i) review and critical analysis of existing studies on urban mining, ii) three case studies, which illustrate energy and resource savings through urban mining (using material flow analysis and life cycle assessment) for specific parts of the material stock in society, and iii) organized workshops and discussions with stakeholders to identify potentials for urban mining, current barriers and beneficial strategies.

Results

The total anthropogenic material stock amounts to around 400 metric tons per capita, mostly consisting of mineral materials (concrete, bricks, sand and gravel). Although the size of anthropogenic stocks has been analysed in numerous studies, there is a lack of studies focusing on the actual recoverability of anthropogenic materials in terms of availability, accessibility, grade and composition.

Various external factors such as legislation, markets, and technologies determine the dynamic boundaries between resources (potentially recoverable materials) and reserves (actually recoverable materials under current conditions). The successful implementation of urban mining strategies is therefore a multi-disciplinary endeavour including legal, economic and technical factors. Thus, political incentives and societal awareness are as important as the promotion of topical research to fully exploit the potential of our urban mines.

- Photovoltaic modules will only become relevant as a waste stream for the recycling industry in 10 to 15 years due to steadily growing capacities in the past and their average useful lives of around 25 years. Nevertheless, there are many measures in different areas that need to be implemented in the near future in order to enable optimal PV recycling in Austria.
- Materials in underground infrastructures are associated with specific challenges and opportunities for urban mining due to their location. Interventions are typically associated with excavation activities, which often result in traffic restrictions and are associated with high costs (planning, implementation), especially in urban areas. Therefore, integrated and life

cycle-oriented management of these infrastructures holds the potential to better utilize these materials (mainly copper and aluminium) as secondary raw materials, which results in ecological and economic benefits.

- Due to the large amount of recyclable materials in buildings, they are a significant source of potentially secondary raw materials, which should be further exploited. Concerning the management of end-of-life buildings, the renovation and further utilization of building parts as well as component reuse hold the highest potentials for energy and raw material savings. In general, detailed planning (including a recycling concept) of de-construction and its careful implementation are the basis for reuse or high-value recycling of building materials and therefore for the resource-efficient management of old buildings.

Outlook and Suggestions

The definition of the term “urban mining” is currently too vague and is also used ambiguously by experts. Therefore, the term should be used more concisely in general and with regard to public relations, it should include specifications on the research subjects and system boundaries of interest. Based on the present study, the following recommendations on the implementation of urban mining to increase resource efficiency can be given:

- Establish organisational structures that support networking of actors along the whole value chain (e.g. for buildings, photovoltaics and infrastructure).
- Develop databases, that characterize anthropogenic stocks in terms of type and quantity of raw materials including further information like spatial distribution (e.g. raw material cadastre).
- Develop concepts for modular design of buildings, for example to extend the useful life or reuse of individual modules.
- Develop and evaluate new business models for recycling and reuse of secondary raw materials.
- Develop methods to consider life cycle costs - especially to select best projects related to public tenders.
- Analyse different “Design-for-Recycling” concepts in terms of lifetime and impact on the operation and use phase (for example, through life cycle assessment).

1. Ausgangslage

1.1 Einleitung

Es ist in Mode, Kreisläufe zu schließen, Ressourcen zu schonen und „Circular Economy“ Initiativen beizutreten. Prozesse wie Recycling, Rohstoffgewinnung, Urban Mining, Landfill Mining, Abfallvermeidung, stoffliche Verwertung wie auch Ökodesign, ökologischer Fußabdruck und „Zero Waste“ sind Begriffe, die zunehmend von Politiker*innen und Industriellen genutzt werden. Dies bedeutet auch, dass die Gesellschaft hinsichtlich Abfall- und Ressourcenmanagement zu erkennen beginnt, dass Ressourcen (auch Abfälle) soweit wie möglich geborgen und genutzt werden müssen (Cossu et al. 2015). Die Nutzung natürlicher Rohstoffe in langlebigen Produkten und Bauwerken führt dazu, dass sich in unseren Städten enorme Materiallager aufgebaut haben. Für manche Materialien liegen diese „anthropogenen Lager“ bereits in der Größenordnung der Reserven in natürlichen Lagerstätten (z.B. Kupfer) vor, weshalb deren Rückgewinnung und Recycling in erheblichem Maß zur Schonung natürlicher Ressourcen und zur Reduktion von Emissionen beitragen kann. So werden beispielsweise durch Aluminiumrecycling sowohl Emissionen reduziert als auch der Energiebedarf um das 10- bis 20-fache gegenüber der Primärproduktion verringert.

Urban Mining umfasst die Identifizierung anthropogener Lagerstätten, die Quantifizierung der darin enthaltenen Sekundärrohstoffe, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen vor dem Hintergrund der zur Verfügung stehenden technischen Rückgewinnungsvarianten und den derzeitigen und prognostizierten Erlösen. Letztendlich wird die wirtschaftliche Aufbereitung und Wiedergewinnung der identifizierten Wertstoffe sowie die integrale Bewirtschaftung anthropogener Lagerstätten behandelt (Urban Mining 2018).



Abbildung 1: Symbolbild Urban Mining (Droog 2018)

1.2 Ziel des Projektes

Das gegenständliche Projekt untersucht den potentiellen Beitrag von Gebäuden und Infrastruktur zur Ressourceneffizienz moderner Städte durch Urban Mining. Etablierte Abfallbehandlungs- und Recyclingsysteme, wie z.B. für Siedlungsabfälle, Elektroaltgeräte oder Alt-Kraftfahrzeuge, und auch die Rückgewinnung von Rohstoffen aus Deponien (Deponierückbau oder Landfill Mining) werden in der Studie nur am Rande behandelt.

Der im Rahmen des Programms „Stadt der Zukunft“ verfolgte Urban Mining-Ansatz bezieht sich neben der Abfallverwertung in Städten schwerpunktmäßig auf die Nutzung und Verwertung von bestehenden Gebäuden sowie bestehender städtischer Energieinfrastruktur. Die Steigerung der Ressourcen- und

Energieeffizienz spielt in diesem Zusammenhang eine zentrale Rolle und wird anhand der Fragestellungen bearbeitet und bewertet. Das Ziel des Projektes ist es, Energie- und Ressourceneinsparungen durch die gezielte Nutzung und Verwertung städtischer Materiallager zu untersuchen und anhand drei konkreter Fallstudien (Case Studies) darzustellen, welchen Beitrag Urban Mining zur Gestaltung ressourcen- und energieeffizienter Kreisläufe leisten kann.

Dabei sind folgende Fragestellungen von Bedeutung:

- A.** Wo ergeben sich größere Effizienzpotenziale bei der Verwertung bestehender Infrastrukturen? In welchem Verhältnis steht der Material- zum Energieeinsatz?
- B.** Wie kann das Interesse einzelner Hersteller*innen bzw. der Industrie erhöht werden, die Rückgewinnung von Rohstoffen zu erhöhen? Welche Modelle, Konzepte oder Anreize gibt es?
- C.** Welcher Mehraufwand (Energie, Kosten) entsteht bei der Herstellung recyclingfähiger Produkte und Komponenten, insbesondere bei Erneuerbare-Energie-Anlagen? Wie lassen sich die Kosten senken?
- D.** Wie können Strategien und Rahmenbedingungen, die eine Optimierung von Kreisläufen (z. B. im Bereich Energieinfrastruktur, E-Mobilität) ermöglichen, gestaltet werden?



2. Projektinhalt

2.1 Projektstruktur und Vorgehensweise

Einerseits werden die oben genannten Fragestellungen im Rahmen der Fallstudien (Case Studies) behandelt, andererseits soll vor allem durch die Einbindung von Stakeholder*innen Potentiale, Herausforderungen und Hindernisse für Urban Mining im Bereich Gebäude und städtische Infrastruktur identifiziert werden.

Die Fallstudien dienen dazu, in quantitativer Art und Weise Energie- und Ressourceneinsparungen für konkrete Urban Mining-Strategien zu bewerten und dadurch Chancen und Herausforderungen beispielhaft aufzuzeigen. Der Austausch von spezifischen Erfahrungen und Wissen im Rahmen von Workshops soll zusätzlich die Breite möglicher Urban Mining-Ansätze aufzeigen. Weiters sollen optimierte Randbedingungen für Urban Mining diskutiert werden.

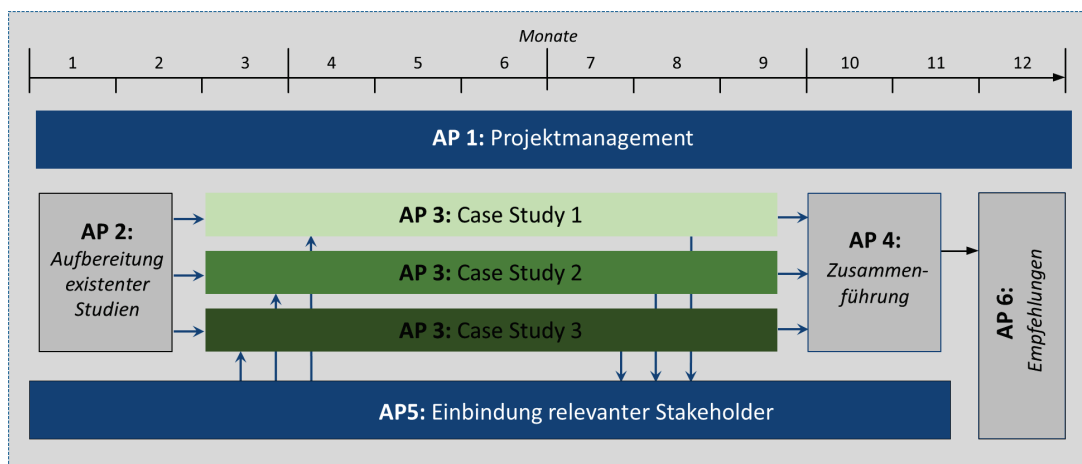


Abbildung 2: Projektstruktur

In Abbildung 2 ist die Projektstruktur schematisch abgebildet. Der wissenschaftliche Ansatz des vorgeschlagenen Projekts setzt sich aus einer kritischen Analyse und Auswertung bestehender Arbeiten zum Thema Urban Mining von Gebäuden und städtischer Infrastruktur (AP 2), konkreten Fallstudien, die spezifische quantitative Grundlagen in Bezug auf Energie- und Ressourceneinsparungen durch Urban Mining schaffen (AP 3 und 4), sowie einem strukturierten Austausch- und Diskussionsprozess mit relevanten Akteur*innen zur Identifikation von Optimierungspotentialen auf breiter Basis sowie damit verbundenen Herausforderungen und Barrieren (AP 5) zusammen. Zusätzlich werden Empfehlungen für die Umsetzung von Urban Mining Strategien zur Steigerung der Ressourceneffizienz auf städtischer Ebene diskutiert (AP 6).

2.2 Desk Research (Urban Mining)

Durch die Sichtung und Analyse unterschiedlicher Informationsquellen, wie Literatur und Online-Medien werden bestehende Erkenntnisse zum Thema Urban Mining von Gebäuden und Infrastrukturen erfasst, ausgewertet und interpretiert. Die Erkenntnisse dienen dazu, einen Überblick bestehender Arbeiten zu erlangen und stellen einen wesentlichen Input zur Fokussierung der Projektfragestellungen bzw. -aktivitäten dar. Die Ergebnisse der Sekundärforschung finden sich im

Kapitel 3.1 „Urban Mining“ wieder bzw. werden die Fallstudien (Kapitel 3.2.1 bis 3.2.3) durch sekundäre Literatur ergänzt.

2.3 Fallstudien (Case Studies)

Ziel für die konkreten Fallstudien ist die Bewertung ressourcen- und energieeffizienter Kreisläufe durch Urban Mining, die Erfassung von Energie- und Materialflüssen und die Quantifizierung ökologischer Optimierungspotentiale. Es werden somit konkrete Ansätze zur Gestaltung ressourcen- und energieeffizienter Kreisläufe durch Urban Mining erfasst. Je nach Fallstudie kommen dazu die Methode der Stoffflussanalyse (SFA) sowie die Methode der Ökobilanzierung (=Life Cycle Assessment, LCA) zur Anwendung. Hintergrundinformationen und der Stand der Technik in Bezug auf die Fallstudien finden sich in Kapitel 3.1.3. Eine detaillierte Zusammenstellung sowie die Bewertung ressourcen- und energieeffizienter Kreisläufe durch Urban Mining sind anschließend in den Kapiteln 3.2.1 bis 3.2.3 beschrieben.

- **FALLSTUDIE 1: PHOTOVOLTAIK-ANLAGEN**

Im Zuge von *Fallstudie 1* wird die effiziente Nutzung bzw. Rückgewinnung von Materialien in Photovoltaik-Anlagen untersucht. Ziel dieser Fallstudie ist es, unterschiedliche Arten von Photovoltaik-Modulen (kristalline Module, Dünnschichtmodule) in Hinblick auf potentielle Energie- und Ressourceneinsparungen durch Recycling der eingebauten Materialien bzw. Wiederverwendung von Komponenten, sowie mögliche Verbesserungen in Bezug auf die Zerlegbarkeit und Verwertbarkeit der PV-Anlagen zu bewerten.

- **FALLSTUDIE 2: ERDVERLEGTE INFRASTRUKTUR**

Im Zuge von *Fallstudie 2* wird die Bewirtschaftung von erdverlegten Infrastrukturnetzwerken über den gesamten Lebenszyklus untersucht. Das Ziel ist es, für ausgewählte Netzinfrastrukturen (Strom und Telekommunikation) darzustellen, welche Energie- und Ressourceneinsparungen durch die integrierte Bewirtschaftung und Rückgewinnung der Netzinfrastrukturen möglich sind.

- **FALLSTUDIE 3: GEBÄUDE**

Im Zuge von *Fallstudie 3* wird die ressourceneffiziente Bewirtschaftung von Gebäuden am Ende ihrer Nutzung betrachtet. Das Ziel der Fallstudie ist es, anhand eines konkreten Beispiels darzustellen, welche Strategien zur Nutzung und Verwertung eines Alt-Gebäudes am effektivsten zur Schonung von Ressourcen/Energie beitragen. Die zu untersuchenden Strategien umfassen die Weiternutzung des Tragwerks (nach gründlicher Entkernung) als Wohngebäude, sowie den Abriss (konventionell vs. selektiver Rückbau) mit anschließendem Neubau (baugleich vs. ähnlich zu anderen Wohnneubauten in städtischen Erweiterungsgebieten).

Fallstudie 1 fokussiert auf die Abschätzung zukünftiger Potentiale (z.B. jährlicher Abfallmengen) bzw. auf unterschiedliche Recycling-Möglichkeiten einzelner Photovoltaik-Module. Vor allem Strategien im Bereich des Produktdesigns werden im Detail diskutiert. Die Fallstudien 2 und 3 fokussieren auf die integrierte und ressourceneffiziente Bewirtschaftung und Rückgewinnung von Materialien aus der

erdverlegten Infrastruktur und dem Hochbau. Bei den Fallstudien werden methodisch die Energie- und Materialflüsse über den gesamten Lebenszyklus anhand von Ökobilanzen (gemäß (ISO 14040 2006)) erfasst und bewertet. Anhand einer Szenarienanalyse werden Urban Mining Strategien abgeleitet.

2.4 Stakeholder*innen-Einbindung (Workshops)

Ziel ist die Abholung des allgemeinen Stakeholder-Know-Hows (das spezifische Know-How wird in den Case Studies eingebracht). Eingeholt werden die Kenntnisse zu technischen, rechtlichen, wirtschaftlichen und organisatorischen Hemmnissen und Barrieren des Urban Mining, das langfristig realisierbare Potenzial von Urban Mining, sowie die Notwendigkeiten hinsichtlich Technologien und des rechtlichen / politischen Änderungsbedarfs. Die Stakeholder-Einbindung im gegenständlichen Projekt umfasst einerseits Experteninterviews im Rahmen von Fallstudie 1 und andererseits die Durchführung von zwei Stakeholder-Workshops zur Erstellung einer Vision für Urban Mining und der Maßnahmenfindung zur Erreichung dieser Vision. Eine detaillierte Zusammenstellung des Ablaufs, der Inhalte und Ergebnisse der Stakeholder-Workshops findet sich in Kapitel 3.3.



Abbildung 3: Workshop (The Noun Project 2018).

Das Ergebnis bildet eine Basis für die Schlussfolgerung und Empfehlungen. Der „Quasi-Fahrplan“ skizziert die langfristigen Möglichkeiten, die nächsten Schritte und die politisch-rechtlichen Änderungsbedarfe. Die IEA Guideline (IEA 2014) wird in Analogie zu den erstellten Energietechnologie-Roadmaps adaptiert, um die Kenntnisse von Stakeholder*innen/ Expert*innen in den Prozess zur Erstellung von Empfehlungen einzubinden. Ziel der Anwendung der IEA Guideline ist es, (i) das in der Praxis langfristig erzielbare Potenzial von Urban Mining zu klären, (ii) aktuelle rechtliche und marktbedingte Barrieren aufzuzeigen, (iii) politische Empfehlungen gemeinsam mit den Stakeholder*innen zu diskutieren bzw. auszuarbeiten und (iv) erforderliche technische Entwicklungen zu identifizieren.

3. Ergebnisse

3.1 Urban Mining: Einleitung

Durch Sichtung und Analyse unterschiedlicher Literatur wird im Folgenden ein Überblick bestehender Arbeiten zu Urban Mining gegeben, wobei der Fokus auf die Inhalte der Fallstudien gelegt wird.

3.1.1 Einführung: Urban Mining?

Vor einem halben Jahrhundert verkündete Jacobs (1961), dass "Städte die Minen der Zukunft sind". Diese Aussage beruhte auf Tatsachen, die heute bedeutender sind, als Jacobs (1961) damals ihre Worte schrieb: (1) Bergbau ist energieintensiv und ökologisch problematisch, (2) Extraktionsraten steigen an, da die Metallkonzentration im Gestein weiter abnehmen, (3) ein großer Teil des abgebauten Metalls fließt in Städte, wo es in der Infrastruktur, im Transportwesen und in vielen anderen Produkten eingesetzt wird, (4) "städtische Erze" können eine Alternative zum Bergbau sein (Graedel 2011). Aufgrund dieser Tatsachen gewann seit damals der Begriff des „Urban Mining“ oder „städtischen Bergbaus“ zunehmend an Bedeutung (Baccini 1989, Brunner 2001, Brunner 2011, Graedel 2011, Lukschanderl 2011, Weichbrodt 2014).

Urban Mining erweitert den Begriff Landfill Mining auf den Prozess der Rückgewinnung von Verbindungen und Stoffen aus jeder Art anthropogener Bestände, einschließlich Gebäude, Infrastruktur, Industrie und Produkte (in und außer Betrieb) (Cossu et al. 2015). Aus Sicht des deutschen Umweltbundesamtes ist Urban Mining die integrale Bewirtschaftung des anthropogenen Lagers mit dem Ziel, aus langlebigen Produkten, Gebäuden, Infrastrukturen und Ablagerungen Sekundärrohstoffe zu gewinnen (Müller et al. 2017).

In Österreich beschäftigt sich die 3. Säule des österreichischen Ressourceneffizienz Aktionsplan (REAP) des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus mit der Schonung von primären Ressourcen, dem effizienten Umgang mit Rohstoffen durch Steigerung der Ressourceneffizienz und Verbesserung des Recyclings. Dazu wurden zehn Maßnahmen definiert, um die Effizienz zu steigern. Neben verschiedenen Maßnahmen zur Umweltförderung, Beratung und Recycling kritischer Materialien zielt vor allem die Maßnahme 6 auf die Nutzung des anthropogenen Lagers (Urban Mining) ab. Speziell der Bereich des Recyclings von Materialien aus Infrastrukturen wird als ein wichtiges Zukunftsthema für die Abfallwirtschaft genannt (BMLFUW 2012). Große Mengen an wertvollen Stoffen und Materialien (z. B. Metalle wie Kupfer) sind in den bereits bestehenden Infrastrukturen unseres Wirtschaftssystems eingebaut und gespeichert. Laut REAP fordert ihre effiziente Wiedergewinnung einen recyclingorientierten Rückbau sowie entsprechende Informationssysteme wie z.B. einen Gebäudepass (BMLFUW 2012).

In der Vergangenheit wurden hauptsächlich primäre Ressourcen eingesetzt, die aus diversen Gründen in der Zukunft unzureichend oder nicht verfügbar sein werden. Deshalb wird es zunehmend wichtiger, das anthropogene Lager räumlich zu charakterisieren (Van Beers et al. 2007), um es anschließend nutzbar zu machen. „Anthropogene Lager“ sind Anreicherungen von Materialien in der Anthroposphäre. Ziel von „Urban Mining“ ist das Erkennen von Wertstoffen in Gebäuden und der Infrastruktur, noch bevor diese zu Abfall werden und sie zukünftig als Sekundärrohstoffe zu nutzen (Lukschanderl 2011). Dazu gilt es Strategien zu entwickeln, um die in verschiedenen langlebigen Gütern, wie Gebäuden und Infrastrukturen, gebundenen Materialien zu erfassen (Krook et al. 2015,

Kleemann et al. 2016). Darauf aufbauend bedarf es der Bewertung der potentiellen Abbauwürdigkeit dieser Materialien, um zu ermitteln, welcher Anteil wieder in den Wirtschaftskreislauf integriert werden kann (Lederer et al. 2014). Die Materialien finden sich sowohl in der Nutzungsphase (Gebäude, Infrastrukturen, Konsumgüter) als auch in der Abfallwirtschaft (Halden und Deponien) (Kral et al. 2017). Für die Abschätzung des Ressourcenpotentials ist das Wissen um die Verfügbarkeit der Materialien im Sinne von „Ressourcen“ und „Reserven“ entscheidend (Kral et al. 2017). Gemäß McKelvey (1973) sind „Ressourcen“ die Gesamtmenge aller vorhandenen Materialien, wobei diese nach der Wahrscheinlichkeit des Vorkommens in „nachgewiesen“, „vermutet“ und „hypothetisch bzw. spekulativ“ eingeteilt werden können. Die „Reserven“ sind eine Teilmenge der „Ressourcen“ und bezeichnen jene Materialmengen, die nachgewiesen oder vermutet werden und unter den derzeitigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen gewinnbar sind.

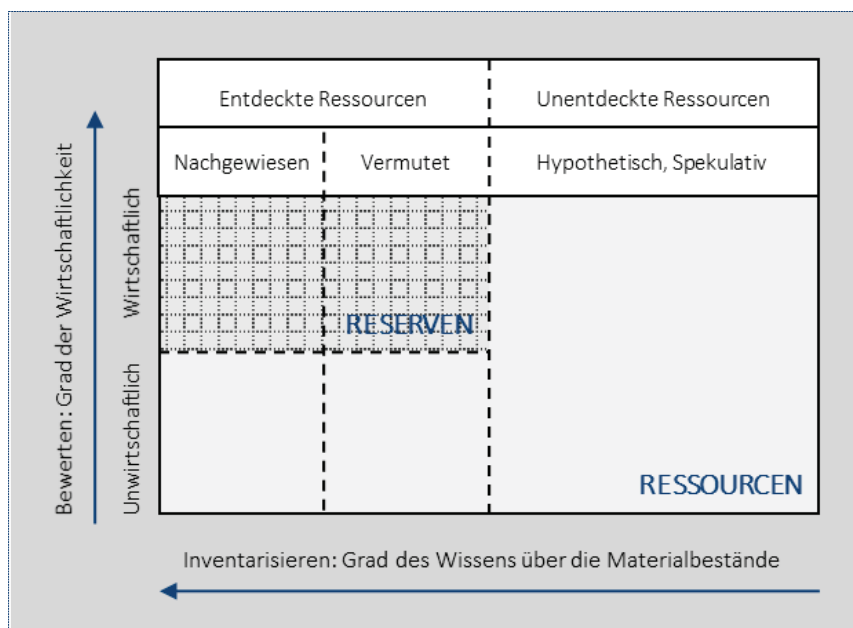


Abbildung 4: Das Klassifikationssystem nach McKelvey ist der konzeptionelle Rahmen, um die Verfügbarkeit von Materialien in Lagern beurteilen zu können (Die Abbildung basiert auf McKelvey (1976) und ist vereinfacht in Kral et al. (2017) dargestellt)

Basierend auf McKelvey gibt es diverse Klassifizierungscodes bzw. Bewertungssysteme für Primärressourcen (u.a. CRIRSCO, UNFC, USGS). Diese definieren mineralische Ressourcen als Rohstoffe mit begründeter Aussicht auf wirtschaftliche Gewinnung, aktuell oder in absehbarer Zukunft. Mineralische Reserven sind Ressourcen, die unter gegenwärtigen Bedingungen bekanntermaßen wirtschaftlich abbaubar sind. Äußere Faktoren wie etwa die Rechtslage, Markt, Technologien etc. bestimmen die sich ständig verändernden Grenzen zwischen Ressourcen und Reserven. Für die Bewertung anthropogener Ressourcen entwickelte Winterstetter et al. (2016) ein Framework, welches sich an bestehenden Methoden für Primärressourcen orientiert. Im Kontext des städtischen Bergbaus werden anthropogene Materiallager als Lagerstätten betrachtet, die ein Reservoir an zukünftigen Sekundärrohstoffen darstellen. Einerseits werden durch die Rückgewinnung von Rohstoffen aus dem anthropogenen Lager natürliche Ressourcen geschont und der Selbstversorgungsgrad in Österreich erhöht. Andererseits wird durch die Nutzung von Sekundärrohstoffen die Umwelt geschont, da das Recycling in der Regel mit erheblich geringerem Energieaufwand und Emissionen verbunden ist, als die Primärproduktion. Urban Mining ist kein gänzlich von der Abfallwirtschaft losgelöster Ansatz. Es ersetzt auch keineswegs regulierte abfallwirtschaftliche Bereiche – vielmehr ergänzt und unterstützt es diese methodisch und konzeptionell (Müller et al. 2017).

Die Abfallhierarchie, der sämtliche Rechtsvorschriften in Zusammenhang mit der Abfallwirtschaft zugrunde liegen, gibt gewissermaßen einen Rahmen für Urban Mining vor. Neben der Vermeidung, welche oberste Priorität hat, wird vor allem die Wiederverwendung (Reuse) sowie das Recycling angestrebt. Die Abfallhierarchie ist in der Abfallrahmenrichtlinie der Europäischen Union (2009/28/EG) in Artikel 4 definiert. Gemäß Artikel 4 der Abfallrahmenrichtlinie sind die Mitgliedsstaaten dazu angehalten, jene Optionen der Abfallhierarchie zu fördern, die insgesamt das beste Ergebnis aus dem Blickwinkel des Umweltschutzes bieten. Für manche Abfallströme kann somit auch ein Abweichen von der Abfallhierarchie gerechtfertigt sein, sofern dies dem Lebenszyklusgedanken in Bezug auf die Bewirtschaftung der betreffenden Abfallströme entspricht.

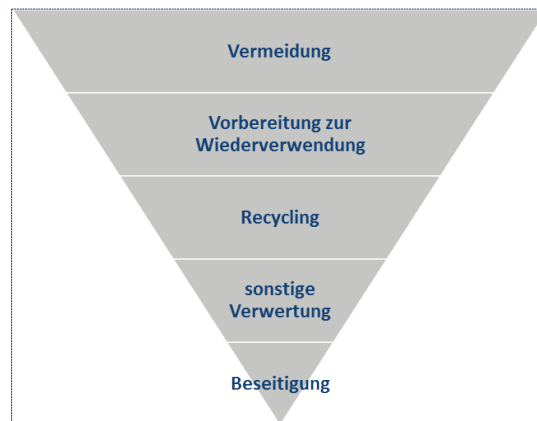


Abbildung 5: Abfallhierarchie auf Basis von BMNT (2018)

In der Abfallhierarchie spiegelt sich auch das Bestreben der Europäischen Kommission nach einer Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) wider. Ziel der Europäischen Kommission ist die Schaffung einer kreislauforientierten Wirtschaft, bei der es darum geht, den Wert von Produkten, Stoffen und Ressourcen innerhalb der Wirtschaft so lange wie möglich zu erhalten und möglichst wenig Abfall zu erzeugen. Dies stellt einen wesentlichen Beitrag zu den Bemühungen der EU um eine nachhaltige, CO₂-arme, ressourceneffiziente und wettbewerbsfähige Wirtschaft dar (European Commission 2015). Gemäß den Plänen der Europäischen Kommission zur Schaffung einer Kreislaufwirtschaft wird das Ziel verfolgt, Wertstoffe so lange wie möglich im Wirtschaftskreislauf zu belassen. Die Stufen der Abfallhierarchie sind integraler Bestandteil einer Circular Economy, wobei jener Anteil der Massenströme, welcher der Beseitigung zugeführt wird, möglichst geringgehalten werden muss. Abbildung 6 fasst das Modell der angestrebten Circular Economy zusammen.



Abbildung 6: Modell der Circular Economy (Institute 2018)

3.1.2 Literatur: Urban Mining

Verschiedene nationale und internationale Studien zum Thema Energie- und Ressourceneinsparung durch Urban Mining wurden identifiziert und ausgewertet. Die Analyse dieser Studien erfolgte basierend auf der Recherche und Prüfung unterschiedlicher Quellen, von der wissenschaftlichen Literatur (Fachzeitschriften) über Projektberichte bis zu anderen Print- und Online-Medien (Zeitungen, Webseiten usw.). Es wurden vordergründig Studien analysiert, die sich mit der Nutzung und Verwertung von Materialien befassen, die sich in (langlebigen) Produkten oder Bauwerken befinden und aus denen jetzt oder in Zukunft Rohstoffe gewonnen werden können. Der Fokus lag auf dem deutschsprachigen Raum, wobei auch internationalen Studien zum Thema Energie- und Ressourceneinsparung durch Urban Mining ausgewertet wurden. Neben allgemeinen Hintergrundinformationen wurden im Detail folgende Kriterien für die Analyse erhoben (siehe Tabelle 1), welche in den folgenden Kapiteln näher beschrieben werden.

Tabelle 1: Kriterien zur Analyse der Literatur (Studien, Berichte, wissenschaftliche Artikel) zu Urban Mining

KRITERIUM	ERLÄUTERUNG/FRAGE	KOMMENTAR
<i>Hintergrund</i>	Wer hat die Studie beauftragt und warum?	z.B. Auftraggeber, Autoren, Jahr, Titel
<i>Begriffsdefinition</i>	Wie ist Urban Mining im Rahmen der Studie definiert?	<ul style="list-style-type: none"> • ENG: bezieht sich auf Materialien im Lager als Ressource • WEIT: inkludiert die Bewirtschaftung von Abfallflüssen
<i>Ziel der Studie</i>	Warum wurde die Studie durchgeführt?	z.B. Analyse verschiedener Technologien, ökonomische Vergleiche
<i>Fokus der Studie</i>	Welcher Teil des Lagers steht im Zentrum der Studie?	z.B. Hochbau oder Tiefbau oder Linieninfrastrukturen oder „klassische“ Abfallsammlung und -verwertung usw.
<i>Tiefe der Analyse</i>	Wie wird der Nutzen, der durch Urban Mining erzielt werden kann, bewertet?	<ul style="list-style-type: none"> • POTENTIAL-Abschätzung: Darstellung von Materialpotentialen, aber keine weitergehende Bewertung • RESSOURCEN-Abschätzung: Bewertung der tatsächlich (unter technischen, rechtlichen und/oder ökonomischen Randbedingungen) rückgewinnbaren Materialmengen • NUTZEN-Abschätzung: Bewertung des (positiven) Effektes durch Urban Mining, z.B. anhand von Ökobilanzen oder ökonomischen Analysen
<i>Geogr. Bezug</i>	Auf welcher geografischen Ebene ist die Studie angesiedelt?	z.B. städtisch/regional/national/europäisch
<i>Empfehlungen</i>	Beinhaltet die Studie Empfehlungen für Urban Mining Strategien?	z.B. Gibt es Handlungsempfehlungen? Wenn ja, wie detailliert (wie umsetzungsorientiert) sind diese? Worauf basieren sie?

Eine detaillierte Auflistung des Literaturreviews findet sich im Anhang (siehe Kapitel 7.1). Einen Überblick der gesichteten Studien bietet Tabelle 2 und zeigt zusammenfassend die wichtigsten Informationen zu Auftraggeber*innen, Herausgeber*innen, dem Erscheinungsjahr und dem Studientitel. In Summe wurden knapp 30 Studien aus dem Bereich Urban Mining einem Review unterzogen, um einen Überblick zu aktuellen nationalen und internationalen Entwicklungen zu geben. Bei den Studien handelt es sich um 11 nationale und 18 internationale Projekte, wobei der Fokus auf Studien ab dem Jahr 2010 gelegt wurde.

Tabelle 2: Literatur Review: Überblick der gesichteten Studien/Projekte (n=29)

AUFTRAG- GEBER*INNEN	HERAUS- GEBER*INNEN	JAHR	TITEL
Real Estate Investors AG	(Kleemann et al. 2017)	2017	Reduktion von Treibhausgasemissionen und Ressourcenverbrauch durch Gebäudesanierung am Beispiel Projekt Althan Park (ReTreGe-A)
FFG (bmvit)	(Kral et al. 2017)	2017	Der städtische Untergrund als Rohstoffmine? Potential an Sekundärressourcen in der erdverlegten Infrastruktur
UBA (DE)	(Müller et al. 2017)	2017	Urban Mining - Ressourcenschonung im Anthropozän
Horizon 2020 (EU)	(Huisman et al. 2016)	2017	ProSUM Project: Prospecting Secondary raw materials in the Urban mine and Mining wastes (Final Report)
	(Kleemann et al. 2018)	2017	Bewertung von Abfallströmen aus Gebäudeabbrüchen in Wien auf Grundlage von Bildmatching-basierter Veränderungsdetektion
	(Kleemann et al. 2017)	2016	GIS-based Analysis of Vienna's Material Stock in Buildings
	(Elshkaki et al. 2016)	2016	Copper demand, supply, and associated energy use to 2050
	(Lederer et al. 2016)	2016	Prospecting and exploring anthropogenic resource deposits: the case study of Vienna's subway network
	(Lederer et al. 2014)	2016	A framework for the evaluation of anthropogenic resources: the case study of phosphorus stocks in Austria
BMLFUW	(Daxbeck et al. 2015)	2015	Das anthropogene Lager in der Steiermark – Entwicklung eines Urban Mining Katasters
	(Krook et al. 2015)	2015	Urban infrastructure mines: on the economic and environmental motives of cable recovery from subsurface power grids
	(Wallsten et al. 2015)	2015	The economic conditions for urban infrastructure mining: Using GIS to prospect hibernating copper stocks
UBA (DE)	(Dechantsreiter et al. 2015)	2015	Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen
FFG (bmvit)	(Fehringer et al. 2014)	2014	Schaffung von rechtlichen Potenzialen für Urban Mining im Abfallrecht
	(Weichbrodt 2014)	2014	Urban Mining - Strategien zur Nutzung der städtischen Rohstofflager
	(Wallsten et al. 2013)	2013,00	To prospect an urban mine - assessing the metal recovery potential of infrastructure "cold spots" in Norrköping, Sweden
	(Krook et al. 2013)	2013	Getting serious about mining the technosphere: a review of recent landfill mining and urban mining research
	(Krook et al. 2011)	2011	Urban mining: hibernating copper stocks in local power grids
	(Steger et al. 2011)	2011	Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen
	(Graedel 2011)	2011	The Prospects for Urban Mining
	(Lukschanderl 2011)	2011	Urban Mining. Die Stadt als Bergwerk der Zukunft. Sind Mülldeponien die "Goldgruben" von morgen?
UBA (A)	(Reisinger et al. 2009).	2009	Lead, Cadmium and Mercury Flow Analysis – Decision Support for Austrian Environmental Policy
	(Lichtensteiger et al. 2008)	2008	Exploration of Urban stocks
	(Rauch 2009)	2008	Global mapping of Al, Cu, Fe, and Zn in-use stocks and in-ground resources
	(Kapur et al. 2006)	2006	Copper Mines Above and Below the Ground
	(Wittmer 2006)	2006	Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt ein methodischer Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten
	(Van Beers et al. 2003)	2003	The magnitude and spatial distribution of in-use copper stocks in Cape Town, South Africa
BMLFUW	(Stark et al. 2003)	2003	Management von Baurestmassen nach den Gesichtspunkten der optimalen Ressourcennutzung und des langfristigen Umweltschutzes anhand der Güter- und Stoffbilanz des „Bauwerks Österreich“
	(Zeltner et al. 1999)	1999	Sustainable metal management exemplified by copper in the USA

3.1.2.1 Begriffsdefinition

Bei Urban Mining geht es im weitesten Sinne um die Gewinnung von Wertstoffen aus all jenen Quellen, die von Menschenhand geschaffen wurden, also: Gebäude, Infrastrukturen, (langlebige) Konsum- und Anlagegüter und andere. Urban Mining weitet damit das aus der klassischen Recyclingwirtschaft bekannte Diktum „Abfall ist Rohstoff“ aus (Müller et al. 2017). In den betrachteten Studien wird der Begriff Urban Mining sehr verschieden definiert und verwendet. Etwa die Hälfte der Studien definiert Urban Mining „eng“ – das heißt, sie beschäftigen sich hauptsächlich mit der Identifizierung und Quantifizierung des Lagers (siehe Tabelle 3). Diese Studien haben großteils das Ziel, anthropogene Lagerstätten zu identifizieren, quantifizieren, bewerten und zu visualisieren. Dabei steht im Zentrum die Beurteilung des Urban Mining Potenzials des Untersuchungsgebiets oder -objekts.

Tabelle 3: Literatur Review: Definition des Begriffs Urban Mining (n=29)

KRITERIUM	ANZAHL
WEIT: inkludiert die Bewirtschaftung von Abfallflüssen	10
ENG: bezieht sich auf Materialien im Lager als Ressource	15
ENG und WEIT (je nach Kapitel)	4

Ein Drittel der Studien fasst den Begriff Urban Mining „weit“ und inkludiert in der Betrachtungsweise auch die Abfallströme. Hier wurden zum Beispiel die Lageränderung analysiert bzw. erfolgte eine genauere Darstellung der Abfallströme. Ziel dieser Studien ist neben der Erfassung des Urban Mining Potenzials auch die Abschätzung des Gesamtabfallaufkommens je Abfallfraktion im Laufe der Zeit (z.B. Abbruchaktivitäten). Einige – meist umfangreichere Studien – beschäftigen sich je nach Kapitel und Materialien mit Urban Mining im engeren als auch im weiteren Sinne. In einem Review von Krook et al. (2013) wurden Studien einer Sonderausgabe zum Thema Urban und Landfill Mining des „Journal of Cleaner Production“ vier verschiedenen Forschungsthemen zugeordnet (siehe Abbildung 7). Es zeigt sich, dass die meisten Studienbeiträge dem Bereich Materialflüsse (z.B. Charakterisierung des anthropogenen Lagers und deren Auswirkungen auf Landfill Mining) und Governance Network (z. B. Wirtschaft, organisatorische Fragen und Management-Tools) zugeordnet werden können.

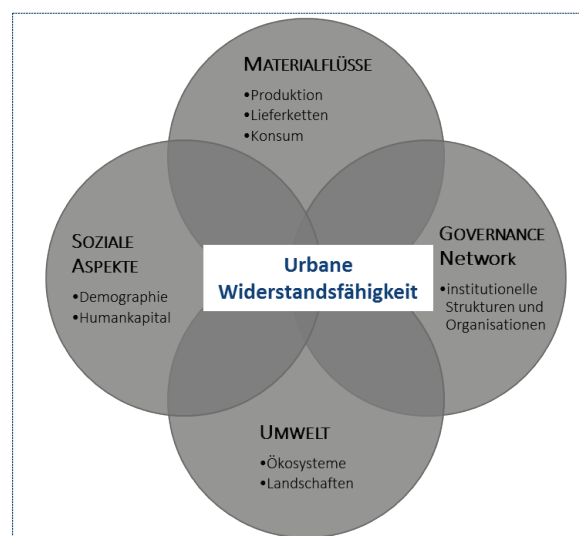


Abbildung 7: Forschungsthemen zur Einteilung von Studien hinsichtlich der urbanen Widerstandsfähigkeit basierend auf Krook et al. (2013)

Das Review von Krook et al. (2013) kommt zu dem Schluss, dass Urban Mining und Landfill Mining ein hohes Potenzial zeigen, aber der Stand der Forschung aktuell noch zu theoretisch ist und damit angewandte Lösungen notwendig sind, um Methoden und Technologien zu entwickeln und um die Leistung solcher Aktivitäten in der Praxis zu bewerten.

3.1.2.2 Fokus und Systemgrenzen

Systemgrenzen definieren die zeitliche und räumliche Abgrenzung des zu untersuchenden Systems. Als zeitliche Grenze wird oft ein Jahr gewählt, als räumliche Grenze kann z.B. eine politische, oder betriebliche Grenze verwendet werden (Brunner et al. 2016). Auch bei Urban Mining Studien ist die Definition von Systemgrenzen essentiell, um Ergebnisse entsprechend zu analysieren und interpretieren bzw. einzelne Studien vergleichbar zu machen.

Im Zentrum der einzelnen Studien steht die Erhebung unterschiedlicher Lager in Abhängigkeit der betrachteten Sektoren und Materialien. Entweder wird ein Sektor (z.B. Netzinfrastuktur) im Detail, ein Material (z.B. Kupfer) in der gesamten Anthroposphäre oder ein Material in einem definierten Sektor (z.B. Kupfer in der Netzinfrastuktur) untersucht. Die Studien fokussieren auf unterschiedlichste Bereiche und es werden sowohl Lagerstätten aus Hoch- und Tiefbau als auch mobile Güter wie Elektrogeräte, Fahrzeuge und Batterien analysiert und bewertet (siehe Abbildung 8).

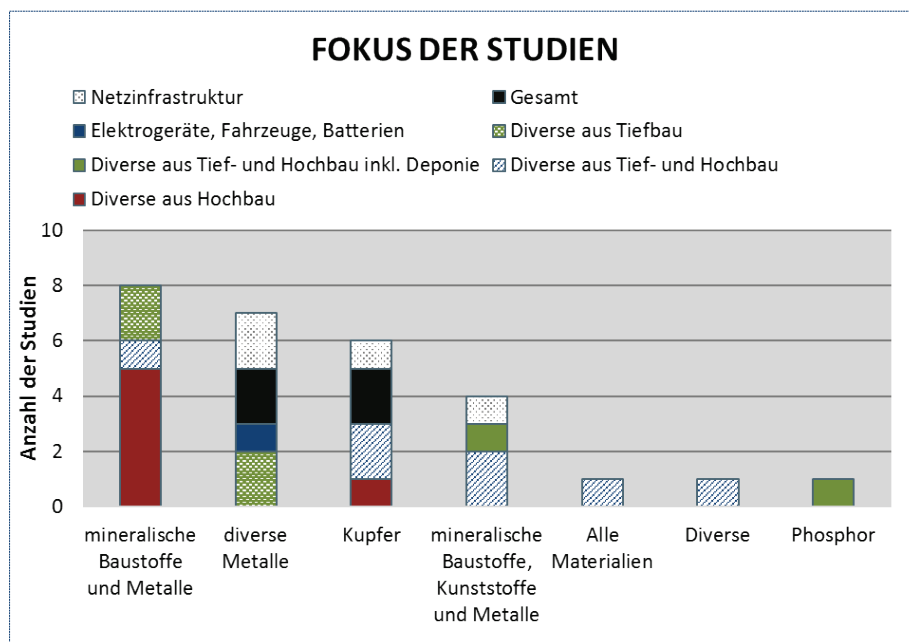


Abbildung 8: Literatur Review: Fokus der Studien (n=29)

Bei Hochbauten liegt der Fokus auf Gebäuden, wobei hier sowohl Wohngebäude als auch Gewerbe- und Industriegebäude betrachtet werden. Am häufigsten wird das quantitativ größte Lager - die mineralischen Baustoffe - untersucht. Vor allem in urbanen Gebieten resultieren große Abfallströme aus Gebäudeabbrüchen. Obgleich gesamthafte Zahlen über den nationalen Anfall an Baurestmassen verfügbar sind, fehlen auf regionaler Ebene oft Daten zu Abbruchabfällen oder sie sind lückenhaft. Im Unterschied zu vielen anderen Abfallarten spielt sich vor allem das Abfallmanagement von Bau- und Abbruchabfällen hauptsächlich auf regionaler und weniger auf nationaler oder gar internationaler Ebene ab. Der Grund dafür ist der limitierte Transportradius (< 50 km) der mineralischen Abfallfraktionen, welche massenmäßig über 90 % darstellen (Kleemann et al. 2018).

Auch Metalle stehen aufgrund ihres monetären und ökologischen Wertes oft im Fokus von Urban Mining Studien. Dasin Zusammenhang mit Urban Mining meist untersuchte Metall ist Kupfer (Rauch 2009). Es werden sowohl das anthropogene Kupferlager selbst als auch Veränderung des Lagers im Laufe der Zeit untersucht. Ein Grund ist, dass Kupfer in seinen Hauptverwendungen meist in reiner Form vorhanden und damit relativ einfach zu recyceln ist (Verwendung in reiner Form als Leiter für Elektrizität und Wärme). Unterschiede hinsichtlich der Rezyklierbarkeit einzelner Metalle sind im folgenden Periodensystem nach Graedel (2011) dargestellt (siehe Abbildung 9). Weitere Metalle, die als relativ leicht recycelbar eingestuft wurden, sind Blei (in Batterien in nahezu reiner Form) und fünf Edelmetalle (Gold, Silber, Platin, Palladium und Rhodium).

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	(117) (Uus)	118 Uuo
* Lanthanides			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
** Actinides			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

(a)
 (b)
 (c)
 (d)

Abbildung 9: Das Recycling-Potenzial von Metallen in städtischen Beständen (Graedel 2011).
 (a) das Metall ist in seinen häufigsten Anwendungen relativ leicht zu recyceln, da es sich in seiner reinen Form befindet oder relativ leicht zu ihr zurückgeführt werden kann. (b) die häufigsten Anwendungen des Metalls liegen in Mehrkomponentenlegierungen, so dass das Recycling wahrscheinlich nur als Legierung erfolgt, wenn überhaupt. (c) die häufigsten Anwendungen sind stark gemischte Verbindungen, für die das Recycling schwierig ist und nur an wenigen Institutionen weltweit durchgeführt wird. (d) die vorherrschenden Verwendungen des Metalls sind dissipativ, so dass eine geringe oder keine Wiederverwendung möglich ist.

Die Abbildung zeigt, dass das Recyclingpotential maßgeblich von der Verwendung der Metalle abhängt. Die Einteilung der Metalle in die vier Gruppen auf Basis von Graedel (2011) zeigt, dass nur 12 % in der leicht zu recycelnden Gruppe, 46 % in der recycelbaren Gruppe, 33 % in der komplexen und unwahrscheinlich recycelten Gruppe und 9 % in der vorwiegend dissipativen Gruppe sind. Die Materialwissenschaften stehen vor einer großen Herausforderung, auf die bislang nicht oder nur wenig eingegangen wurde. Die Herausforderung besteht darin, Materialformen zu erfinden, zu verwenden und / oder vorzuschreiben, die eine hohe Produktleistung unterstützen und gleichzeitig ein hohes Recyclingpotenzial aufweisen. Bis diese Herausforderung erfüllt ist, wird "Urban Mining" fast aller Metalle problematisch bleiben.

Hinsichtlich der geografischen Systemgrenze wurden die Studien sowohl auf globaler, nationaler oder städtischer Ebene durchgeführt, wobei einige Studien je nach Material das Urban Mining Potenzial auf unterschiedlichen Ebenen analysierten. Gerade auf nationaler Ebene übersteigen die anthropogenen Lager oft geologische Ressourcen – vor allem, weil viele Länder nicht über Primärrohstoffe verfügen. Da das Review speziell auf deutschsprachige Studien ausgerichtet war, sind Studien aus Deutschland, Schweiz und Österreich am häufigsten (siehe Abbildung 10).

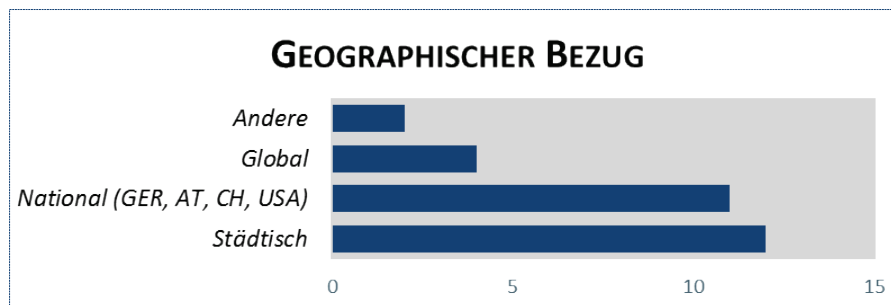


Abbildung 10: Literatur Review: geographische Systemgrenzen der Studien (n=29)

Neben der geographischen Systemgrenze spielt die inhaltliche Systemgrenze bei Urban Mining Studien eine wichtige Rolle. Dies ist auch ein wesentlicher Unterschied zwischen Urban Mining und der Abfallwirtschaft. Die Abfallwirtschaft beschäftigt sich im Kern mit dem Abfallaufkommen an sich, dessen Menge, Zusammensetzung und einer bestmöglichen und schadlosen Rückführung der Materialien in den Stoffkreislauf. Urban Mining bezieht dagegen den Gesamtbestand an langlebigen Gütern, deren Lagerbildung sich schwerer erfassen lässt, mit ein, um möglichst früh künftige Stoffströme prognostizieren zu können und bestmögliche Verwertungswege abzuleiten und zu etablieren, noch bevor die Materialien als Abfall anfallen (Müller et al. 2017).

Urban Mining beginnt bei der Erkundung des anthropogenen Lagers über die Bestimmung der Rückgewinnbarkeit bis hin zur Bewertung der rechtlichen, ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen. Anhand des Kriteriums „Tiefe der Analyse“ kann der Nutzen, der durch Urban Mining erzielt werden kann, bewertet werden. Die Tiefe der Analyse reicht von der Darstellung der Materialpotentials (Potential-Abschätzung), der Bewertung der tatsächlich rückgewinnbaren Materialmengen (Ressourcen-Abschätzung) bis hin zur Bewertung des Effektes durch Urban Mining (Nutzen-Abschätzung). Der Großteil der gesichteten Studien beschäftigt sich mit der Potentialabschätzung, wobei sie auf das Urban Mining Potenzial mineralischer Baustoffe oder Metalle fokussierten. Im Zuge der Potentialabschätzung zeigen die meisten Studien, wie auch (Weichbrodt 2014), dass durch den andauernden Trend der weltweiten Urbanisierung, sowie der komplexeren Produkterzeugung, ein großer Bedarf an Systemen besteht, die mit diesen anthropogenen Rohstofflagern effizient umgehen können. Auch geopolitische Strategien, die aufgrund der weltweit stark konzentrierten Primärrohstoffressourcen von Nöten sind, werden in Anbetracht der zukünftigen Entwicklungen immer relevanter werden, sofern Strategien zu Urban Mining nicht rechtzeitig eingesetzt werden.

Neben der reinen Potentialabschätzung erfolgt in einigen Studien die Bewertung der tatsächlich (unter technischen, rechtlichen und/oder ökonomischen Randbedingungen) rückgewinnbaren Materialmengen. Wie in Abbildung 11 ersichtlich, wurde zum Beispiel von Krook et al. (2011) das Ressourcenpotenzial von Kupfer in stillgelegten Stromnetzwerken zweier schwedischer Städte analysiert.



Abbildung 11: Karte stillgelegter Nieder- und Mittelspannungsstromkabel (dicke schwarze Linien) in der Innenstadt von Linköping (Krook et al. 2011).

In der Folgestudie (siehe Abbildung 12) wurden einzelne Rückbauszenarien von Leitungen näher untersucht und auch ökonomisch und ökologisch bewertet (Krook et al. 2015).

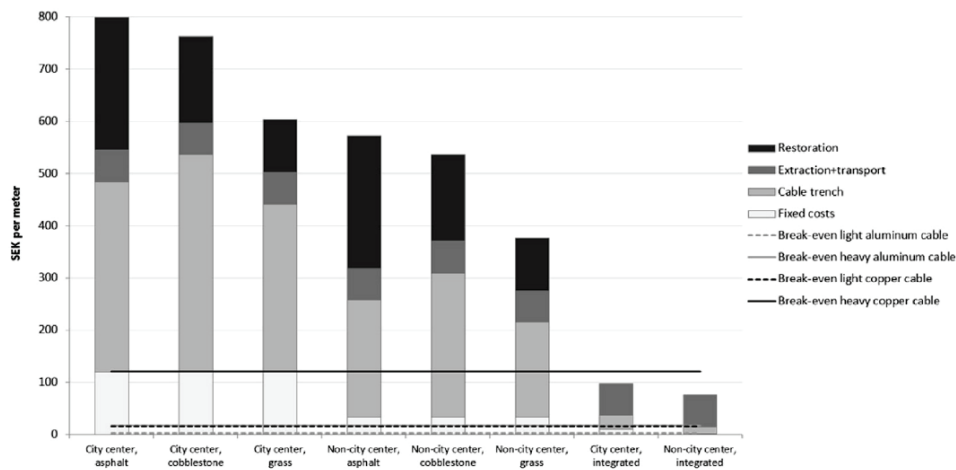


Abbildung 12: Kosten für die reine Kabel- und integrierte Rückgewinnung von stillgelegten Stromkabeln durch konventionelle Erdaushubarbeiten bei unterschiedlichen Oberflächenmaterialien und Standorten (Krook et al. 2015).

Häufig erfolgt auf Basis der Abschätzung der Potentiale und Ressourcen eine Bewertung des (positiven) Effektes durch Urban Mining (z.B. anhand von Ökobilanzen oder ökonomischen Analysen). Wie in Abbildung 12 ersichtlich, erfolgte neben der Abschätzung der rückgewinnbaren Reserven auch eine ökonomische Betrachtung. Weiteres wurde z.B. in der Studie von Kleemann et al. (2017) auch ökologische Rahmenbedingungen untersucht, wie die Mengen an Treibhausgasen und Ressourcen, die eingespart werden können, wenn die Produktion von Stahlbeton durch die Umnutzung von Gebäuden vermieden wird.

3.1.2.3 Anthropogene Lager

Heute liegen die anthropogenen Lager mancher Materialien (z.B. Kupfer) bereits in der Größenordnung der Reserven in natürlichen Lagerstätten vor (Graedel et al. 2004), wobei diese in urbanen Gebieten konzentriert sind (Kapur and Graedel 2006). Deshalb kann deren Rückgewinnung und Recycling in erheblichem Maß zur Steigerung der Ressourceneffizienz moderner Städte beitragen. In Mitteleuropa verbraucht jede*r Einwohner*in rein rechnerisch täglich etwa 40 Kilogramm Bodenschätze und Rohstoffe: Sand und Kies, Erdöl, Gas und Kohle, aber auch Holz, Kunststoff und Metalle. Diesen natürlichen Ressourcen verdanken wir unseren hohen Lebensstandard. Der alltägliche Konsum sorgt aber auch dafür, dass die Lagerstätten an natürlichen Rohstoffen kontinuierlich

schrumpfen, während gleichzeitig der Materialbestand um uns herum rasant zunimmt (Lukschanderl 2011). Die neu eingebauten Materialien sind in der Masse etwa zehnmal so groß wie die „Abfälle“, die dieses Lager wieder verlassen. Derzeit scheitert die effiziente Nutzung der anthropogenen Ressourcen einerseits am Wissen darüber und andererseits an den legitistischen Anreizen (Fehring et al. 2014).

Laut einer Abschätzung beträgt in Österreich das anthropogene Materiallager rund 250 Tonnen je Einwohner*in, wovon rund 50 % in Gebäuden und rund 50 % in der Infrastruktur vorliegen (Daxbeck et al. 2009). Das pro Kopf-Aluminiumlager in Österreich liegt derzeit bei ca. 360 kg und steigt weiterhin stark an, wobei der Großteil des Aluminiums in langlebigen Gütern wie Gebäuden und Fahrzeugen verbaut ist (Buchner et al. 2015b). In Zukunft ist daher von einem Anstieg der Al-Schrottmenge von derzeit ca. 14 kg auf 31 kg pro Einwohner*in und Jahr bis 2050 auszugehen (Buchner et al. 2015). In Wien beläuft sich das gesamte Materiallager in Hochbauten derzeit auf ca. 210 Tonnen pro Einwohner*in, wovon ca. 95 % mineralische Materialien (z.B. Ziegel, Beton), knapp 3 % organische Materialien (z.B. Kunststoffe, Holz), sowie ca. 1,5 % Metalle (z.B. Stahl, Aluminium, Kupfer) sind (Kleemann et al. 2016). Diese anthropogenen Lager tragen im Rahmen etablierter Abfallwirtschafts- und Recyclingsysteme (z.B. Baurestmassenverwertung) bereits erheblich zur Rohstoffversorgung bei, jedoch bestehen in vielen Bereichen noch große Potentiale für Energie- und Ressourceneinsparungen durch proaktives Urban Mining.

Die ausgewählten Studien zeigen die Relevanz des anthropogenen Lagers. Die gesamten anthropogenen Materialbestände können im Durchschnitt mit rund 400 Tonnen pro Einwohner*in abgeschätzt werden, wobei hier eindeutig mineralische Baustoffe das Lager mengenmäßig dominieren. Das Lager an Metallen kann grob mit 15 Tonnen pro Einwohner*in abgeschätzt werden, wobei hier vor allem Eisen und Stahl aus der Bauwirtschaft eine wesentliche Rolle spielen. Die anthropogenen Kupferbestände können mit rund 120 kg pro Einwohner*in abgeschätzt werden. Im Vergleich dazu wurde in einer Studie von Kapur et al. (2006) das weltweite Kupferlager mit 1.688 Millionen Tonnen abgeschätzt (940 Millionen Tonnen als Erz, 330 Millionen Tonnen in Gebrauch und 393 Millionen Tonnen abgelagert).

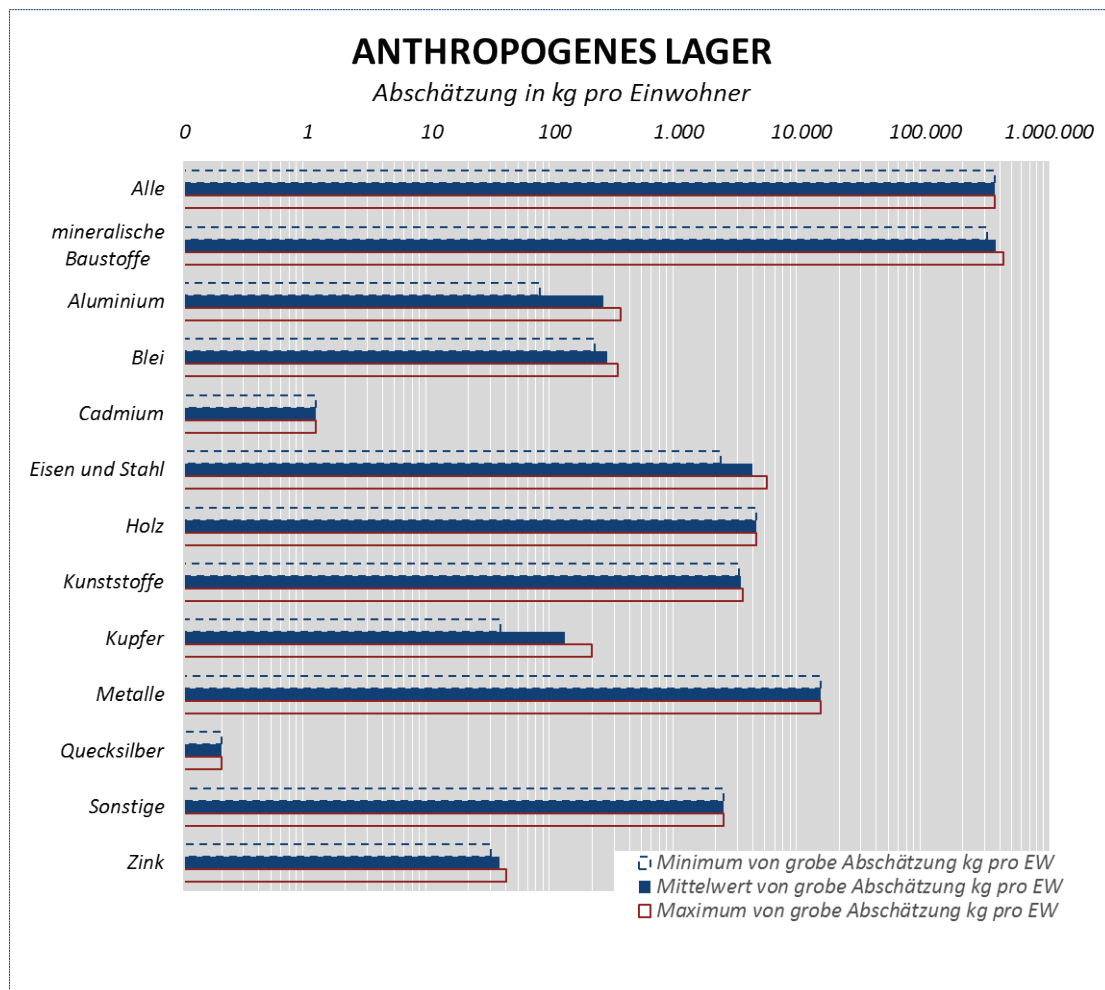


Abbildung 13: Anthropogenes Lager (Abschätzung in kg pro Einwohner je Material) (eigene Darstellung)

Auch wenn die Größe der anthropogenen Materiallager bereits anhand zahlreicher Analysen untersucht wurde, besteht nach wie vor erheblicher Forschungsbedarf was die Charakterisierung dieser Materiallager in Bezug auf ihre Nutzbarkeit als Rohstoffquellen betrifft (Winterstetter et al. 2016). Solche Informationen sind grundlegend für die ökonomische und ökologische Bewertung von Urban Mining, da die Kenntnis der Lage (Kral et al. 2017), des aktuellen Nutzungsstatus bzw. von Zugriffsmöglichkeiten, die Vergesellschaftung von Wert- und/oder Schadstoffen sowie externe Faktoren, wie verfügbare Recyclingtechnologien oder etablierte Sekundärrohstoffmärkte (inkl. Preisentwicklungen) einen wesentlichen Einfluss auf die ökonomische bzw. ökologische Sinnhaftigkeit von Urban Mining haben (Fehring et al. 2014, Krook et al. 2015, Winterstetter et al. 2016). Je nachdem, welcher Teil des anthropogenen Materiallagers einer Stadt betrachtet wird, bestehen unterschiedliche Potentiale zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz. Generell gilt es Bereiche zu identifizieren, die ein substanzielles ungenutztes Lager jetzt und/oder in Zukunft aufweisen und ausreichend Wertstoffe enthalten.

3.1.2.4 Rahmenbedingungen - Empfehlungen

In Abhängigkeit der Fokuse und der Ziele der betrachteten Urban Mining Studien werden unterschiedliche Rahmenbedingungen definiert, um eine effiziente Rückgewinnung von Materialien aus (langlebigen) Gütern am Ende ihrer Nutzungsdauer zu ermöglichen. Dahingehend werden sowohl

politische, rechtliche, technische, ökologische und ökonomische Handlungsempfehlungen ausgesprochen.

Allgemein wird in der Literatur der geringere Primärressourcenverbrauch, dafür erhöhter Sekundärressourceneinsatz (Steger et al. 2011) und die damit verbundene Nutzung von anthropogenen Lagerstätten gefordert. Um eine breite Basis für die zukünftige Gestaltung der Umweltpolitik und auch Urban Mining zu erhalten, muss die quantitative Betrachtung durch qualitative Informationen sowie durch zusätzliche Beurteilungshilfen ergänzt werden (Reisinger et al. 2009). Neben der Lagererhebung sollten auch Ökobilanzierungen durchgeführt werden (Steger et al. 2011), um die Kenntnisse über das anthropogene Lager auszubauen. Dabei sind langfristige Stoffausschleusungen zu berücksichtigen und z.B. selektive Materialrückholungen nach stofflichen Kriterien anzustreben (Stark et al. 2003). Politische Anreize für Urban Mining und in weiterer Folge die Aufklärung der Gesellschaft in Bezug auf dessen Notwendigkeit und Potenziale sind ebenso notwendig, wie die Forcierung der Forschung, da diese den Grundstein für erfolgreiches Urban Mining legt. Vor allem aber ist auf eine stärkere Interaktion zwischen den einzelnen Akteur*innen zu achten (Krook et al. 2013), damit alle an Produktkreisläufen beteiligten Stakeholder*innen ein effizientes Urban Mining ermöglichen (Graedel 2011). Politische Aktionen sind auf der Angebots- sowie der Nachfrageseite notwendig. Es sind sowohl Sekundärrohstoffquellen und optimierte Recyclingraten notwendig, als auch effizientere Produktionssysteme, verringerte dissipative Verwendung von Materialien und ein effizienter Energieverbrauch (Elshkaki et al. 2016).

Aufgrund des großen Ressourcenbedarfs und dem damit verbundenen Abfallaufkommen der Bauwirtschaft sollte an stärkeren, praxisnahen Wiederverwertungsstrategien gearbeitet werden. Hier muss eine solide Schnittstelle zwischen Bauleiter*innen und Recycler*innen gefunden werden, da nur so eine ganzheitliche Sekundärrohstoffstrategie für den Bausektor abgeleitet werden kann. Eine verstärkte Promotion von Sekundärrohstoffen sowie eine rechtliche Basis für den Handel soll geschaffen bzw. muss ausgebaut werden (Dechantsreiter et al. 2015). Hinsichtlich der Bauwirtschaft ist auch ein Überdenken von Baunormen in Hinblick auf Einsparmöglichkeiten notwendig, um den Einsatz von Recyclingmaterialien zu erhöhen (Steger et al. 2011) bzw. kann der Einsatz von Sekundärbaustoffen entsprechend gefördert werden (Daxbeck et al. 2015).

Im Produktdesign sollte der Trend von erhöhtem Einsatz verschiedener Materialien zurückgefahren werden, sowie eine längere Lebensdauer von Produkten angestrebt werden (Graedel 2011). Ebenso sollten Produktdesigner*innen bereits bei der Entwicklung das End-of-Life Stadium des Produktes berücksichtigen (Lukschanderl 2011). Aktuell wird Urban Mining eher aufgrund ökologischer als finanzieller Rahmenbedingungen befürwortet (Krook et al. 2015). Dahingehend ist die Identifizierung relevanter Teilprozesse entlang des Produktlebenszyklus notwendig (Fehringer et al. 2014), um die ökologische Bedeutsamkeit von Urban Mining hervorzuheben (Krook et al. 2015). Effizientere Rohstoff- und Stoffflusssysteme, welche Recycling und Verwertung als Grundprinzipien haben, sind notwendig (Lukschanderl 2011), um Perspektiven zu verändern und um Klimaschutz bzw. reduzierte Mineralressourcenabhängigkeit zu forcieren. Dennoch beruht derzeit die Praxis auf wirtschaftlichen Motiven, welche von einer Vielzahl externe Treiber und vor allem vom Rohstoffpreis abhängig sind. Im ersten Schritt sollten zünftige Studien vor allem auf den monetär hoch dotierten, bzw. schnell wiedergewinnbaren Rohstoffen wie Al, Cu und Kies/Schotter basieren, da hier aktuell die stärksten Sekundärrohstoffpotenziale für die Zukunft bestehen (Lederer et al. 2016).

Die Schaffung eines Ressourcenkatasters als Instrument, um räumliche Ressourcendaten zu erfassen, zu analysieren und auszuwerten, wird in mehreren Studien genannt (Steger et al. 2011, Fehring et al. 2014, Lederer et al. 2016, Kral et al. 2017). Ein Ressourcenkataster würde die Materialbestände nach Art, Menge und Nutzungszustand verorten und damit eine Grundlage für die wirtschaftliche und ökologische Beurteilung der Rohstoffpotentiale liefern (Kral et al. 2017). Speziell ein Kataster für erdverlegte Leitungen (Steger et al. 2011) würde nicht nur Ressourcenpotentiale aufzeigen, sondern auch Bauprojekte vereinfachen. Um die Ressourcendaten in einem Ressourcenkataster zusammenzuführen sind allerdings Standards für die Datenübergabe und eine bundesweite Plattform erforderlich (Kral et al. 2017). Zukünftig sollte ein System aufgebaut werden, das früh Ressourcenpotentiale erkennt, indem genauere Aufzeichnungen bezüglich der Einbauten einbezogen werden (Lederer et al. 2016). Weiters sollten Leitungsdaten verifiziert werden (unter anderem mittels Laserscanner) sowie die historische Entwicklung der Stadt betrachtet und ausgewertet werden (Wallsten et al. 2013). Hinsichtlich der Datenlage ist auch die Datenunsicherheit zu minimieren, sowie weitere Informationsflüsse zu integrieren, um ein fortgeschrittenes Urban Mining Bild zu erhalten (Huisman et al. 2017). Weiterführend könnte auch eine Urban Mining Datenbank erstellt werden, die neben einem Kataster eine Handelsbörse für Materialien/Stoffe aus Urban Mining enthält (Fehring et al. 2014).

Kurz zusammenfassend können folgende Empfehlungen/Rahmenbedingungen aus dem Literatur Review abgeleitet werden:

- Stärkere Interaktion zwischen einzelnen Stakeholder*innen
- Quantitative als auch qualitative Betrachtung des anthropogenen Lagers
- Identifizierung relevanter Teilprozesse entlang des Produktlebenszyklus
- Langfristige Stoffausschleusung und optimierte Recyclingraten
- Längere Lebensdauer von Produkten
- Verringerte dissipative Verwendung einzelner Materialien
- Schaffung eines Ressourcenkatasters mit definierten Standards
- Schaffung einer Handelsbörse für Sekundärrohstoffe
- Förderung des Sekundärrohstoffeinsatzes

3.1.3 Stand der Technik: Fallstudien

Je nachdem welcher Teil des urbanen anthropogenen Materiallagers betrachtet wird, gibt es unterschiedliche Potentiale und Anreize zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz. Generell gilt es Bereiche zu identifizieren, die ein substantiell ungenutztes Lager jetzt und/oder in Zukunft aufweisen und ausreichend Wertstoffe enthalten. Unter diesen Gesichtspunkten lassen sich drei Schwerpunktthemen (Fallstudien) zur Darstellung von Energie- und Ressourceneinsparungen durch Urban Mining identifizieren:

- Erneuerbare Energietechnologien (PV-Anlagen)
- Erdverlegten Infrastrukturen
- Hochbauten

3.1.3.1 Photovoltaik Anlagen – erneuerbare Energieanlagen

Erneuerbare Energietechnologien stellen ein schnell wachsendes Lager an kritischen Rohstoffen dar, die es am Ende der Lebensdauer der Anlagen möglichst effizient zurückzugewinnen und zu verwerten gilt (Zuser et al. 2011, Luidold et al. 2013). Während in peripheren bzw. ländlichen Gebieten die Möglichkeiten erneuerbarer Technologien vielfältig sind, bestehen im urbanen Bereich nur eingeschränkte Möglichkeiten der Nutzung regenerativer Energietechnologien, was v.a. auf die Platzverhältnisse sowie die Konkurrenz zu bereits bestehenden zentralen Energieinfrastrukturen zurückzuführen ist. Stromerzeugung durch Photovoltaik (PV) hingegen eignet sich in ländlichen sowie urbanen Gebieten, wodurch der rasante Ausbau der installierten PV-Leistung in Österreich (von Anfang 2010 bis Ende 2015 wurden 937 MWp installiert (Biermayr et al. 2017)) auch zum Aufbau substantieller Lager, vor allem an Metallen (z.B. Aluminium, Kupfer, Stahl, Tellur, Zink, Zinn) führte. Bis Ende 2016 wurde eine kumulierte PV-Leistung von 1.100 MW installiert, wobei ab 2013 jährlich zwischen 150 und 160 MWp zugebaut wurden (Biermayr et al. 2017). Eine Nutzung dieser Rohstoffe am Ende der Lebensdauer von PV-Anlagen (in der Regel werden 25+ Jahre angegeben, aber hier fehlen Erfahrungswerte) trägt zur Versorgung mit Technologiemetallen und zur Reduktion von Umweltbelastungen bei der Primärproduktion bei (Green Jobs Austria 2013). Als rechtliche Grundlage für das Recycling von PV-Modulen dient die WEEE-Richtlinie (2002/96/EU), die durch die Elektroaltgeräte-Verordnung (EAG-VO) in österreichisches Recht umgesetzt wurde, laut der defekte PV-Module, Wechselrichter sowie Batteriespeicher seit Juli 2014 ordnungsgemäß entsorgt werden müssen. Für den gesamten Lebenszyklus dieser Produkte, inklusive Entsorgung, gilt das Prinzip der Herstellerverantwortung.

Die International Renewable Energy Agency (IRENA) geht Ende 2016 von kumulativen globalen PV-Abfallströmen von bis zu 250.000 Tonnen aus, was 0,6 % der installierten PV-Paneele entspricht. Bis 2030 bzw. 2050 ist mit einem weiteren Anstieg zu rechnen. Insbesondere in den frühen 2030er Jahren werden große Mengen an jährlichem PV-Abfall erwartet, da eine Lebensdauer der PV-Module von etwa 25 Jahren anzunehmen ist. Im Jahr 2050 beträgt die Masse der neu installierten Paneele rund 6,7 Mio. Tonnen. Demgegenüber steht ein PV-Abfallstrom in Höhe von bis zu 6,5 Mio. Tonnen aus jenen Anlagen, die im Jahr 2030 neu installiert wurden. Die Masse an PV-Abfall deckt sich in etwa mit der Masse an neu installierten PV-Paneelen. Eine Übersicht der abgeschätzten Entwicklungen des Abfallaufkommens aus PV-Paneelen zeigt Abbildung 14.

Overview of global PV panel waste projections, 2016-2050

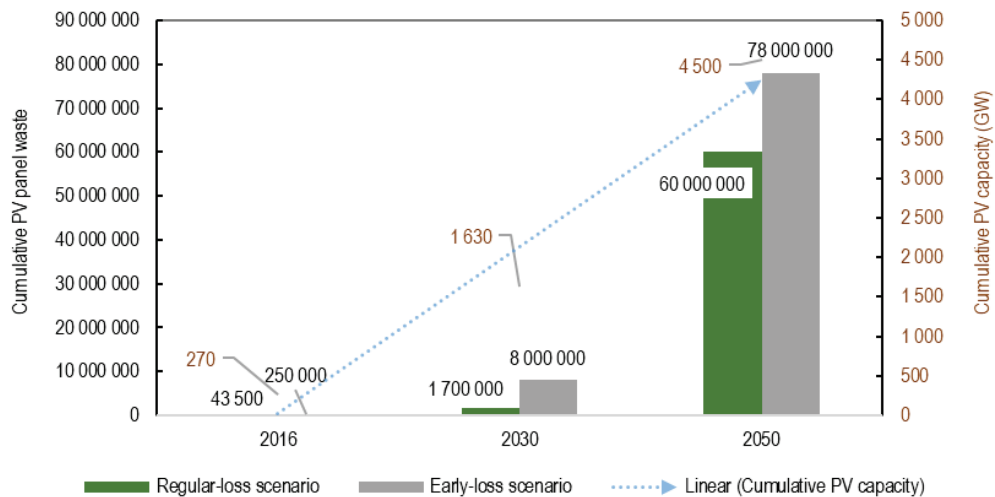


Abbildung 14: Globales Abfallaufkommen aus PV-Paneelen 2016-2050 (Weckend et al. 2016)

IRENA geht davon aus, dass die größten Abfallaufkommen im Jahr 2050 in China (14 bis 20 Mio. Tonnen) und den USA (8 bis 10 Mio. Tonnen) zu erwarten sind. Für Deutschland wird von einem Abfallaufkommen von rund 4 Mio. Tonnen im Jahr 2050 ausgegangen. Derzeit bestehen rund 90 % des PV-Abfallaufkommens aus kristallinen Siliziumzellen. Die restlichen 10 % entfallen auf Dünnschichtzellen (CIS- und Cadmiumtellurid-Technik (CdTe) sowie amorphe Siliziumzellen). Betrachtet man die Entwicklung für Österreich, so wurden 2010 noch 53 % monokristalline, 43 % polykristalline Silizium-Module und 4 % Dünnschichtmodule verbaut. Während Dünnschichtmodule über den gesamten Verlauf zwischen 2010 bis 2016 eine eher untergeordnete Rolle gespielt haben, sank der Anteil der neu installierten monokristallinen Module sukzessive auf 13 % und jener der polykristallinen PV-Module stieg auf 86 % im Jahr 2016 (BMVIT 2017).

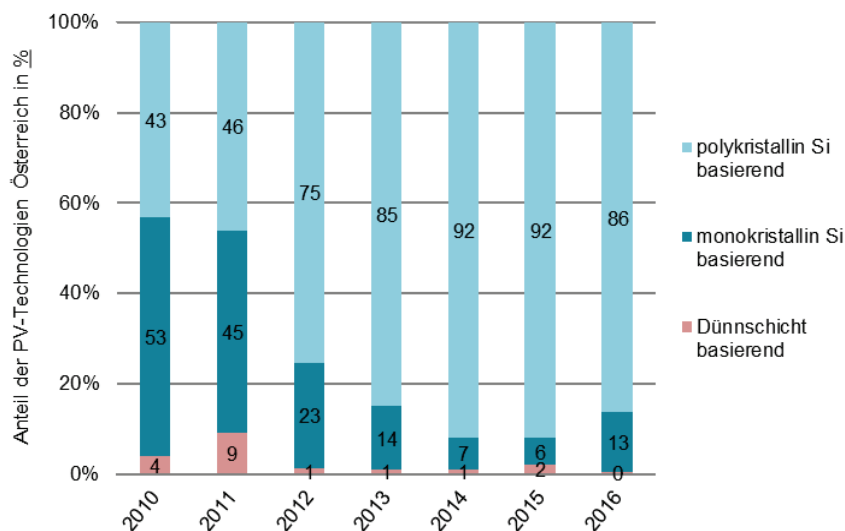


Abbildung 15: Entwicklung der PV-Technologien in Österreich bis 2016 (Biermayr et al. 2016)

Für das Jahr 2020 wird davon ausgegangen, dass sich der Anteil an Dünnschichtzellen im PV-Abfallaufkommen auf 20 % erhöht. PV-Technik basierend auf neuen Trägermaterialien oder organischen Zellen wird ab dem Jahr 2030 einen verstärkten Anteil am PV-Abfallaufkommen

ausmachen, so die Abschätzungen (BINE 2010). Tabelle 4 gibt einen Überblick über den Marktanteil von PV-Modulen nach Technologiegruppen.

Tabelle 4: Marktanteil von PV-Modulen nach Technologiegruppe (2014-2030) (Weckend et al. 2016)

TECHNOLOGIE		2014	2020	2030
Silizium-basiert (c-Si)	Monokristallin	92 %	73,3 %	44,8 %
	Poly- oder Multikristallin			
	Band			
	a-Si (amorph/mikromorph)			
Dünnschicht basiert	Kupfer Indium Gallium (di)selenid (CIGS)	2 %	5,2 %	6,4 %
	Cadmium Tellurid (CdTe)	5 %	5,2 %	4,7 %
andere	Konzentrierte Solar PV (CPV)	1 %	1,2 %	0,6 %
	Organische PV/Farbstoff-sensibilisierte Zellen (OPV)		5,8 %	8,7 %
	Kristalline Siliziumzellen (advanced c-Si)		8,7 %	25,6 %
	CIGS Alternativen, Schwermetalle (z.B. perovskit), advanced III-V		0,6 %	9,3 %

Gemäß der prognostizierten PV-Marktentwicklung kann derzeit von einem relativ homogenen Abfallstrom in Bezug auf die Technologie ausgegangen werden. Zukünftig muss die Recyclingbranche mit einem Anstieg des gesamten Abfallaufkommens an ausgedienten PV-Paneeelen und einer Zunahme der Variabilität der zu behandelnden PV-Paneele und den damit einhergehenden wachsenden technischen, ökonomischen und organisatorischen Herausforderungen rechnen. Daher wird es einer stetigen Entwicklung von Recycling-Techniken und der Schaffung eines organisatorischen Rahmens zur Unterstützung des Recyclings von PV-Modulen bedürfen. Ziel des Recyclings von PV-Modulen ist eine möglichst effektive Extrahierung sortenreiner Rohstoffe, um den Bedarf an Primärrohstoffen zu verringern. Folgende Abbildung zeigt den allgemeinen Aufbau eines kristallinen Siliziummoduls, bestehend aus dem Aluminiumrahmen, einer Glasplatte, der in Laminat eingebetteten Si-Solarzelle sowie der Rückseitenfolie (BINE 2010).

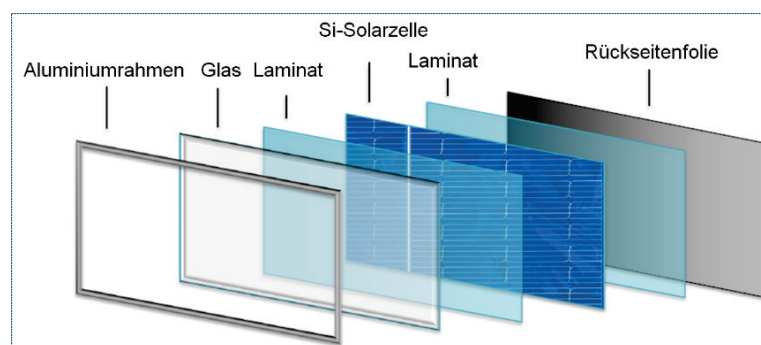


Abbildung 16: Grundsätzlicher Aufbau eines kristallinen Siliziummoduls (Accurec 2013)

Tabelle 5 zeigt eine Übersicht zu den in PV-Modulkomponenten verbauten Materialien, ihren Masseanteil sowie geeignete Verwertungsmöglichkeiten. Glas und Rahmen machen in etwa 30 bis 85 % des Masseanteils der PV-Module aus. Die kristallinen Solarzellen weisen einen Masseanteil zwischen 5 und 10 % auf. Rund jeweils 1 % des Masseanteils entfallen auf elektrische Verbinder und Kabel. Metallteile werden dem etablierten Metallkreislauf zugeführt. Ebenso existiert für das Recycling

von Glas ein etablierter Kreislauf. Die wesentliche Herausforderung liegt im Herauslösen der übrigen Komponenten und dem Recycling der Zellen.

Tabelle 5: Outputfraktion – PV-Modulkomponenten und Verwertungsmöglichkeiten (Fiedler 2016)

MODULKOMPONENTEN	MATERIALIEN	MASSEANTEIL [%]	VERWERTUNGSMÖGLICHKEIT
Glas	Natron-Kalkgläser	30-65	Schaumglas, Fasern, zukünftig evtl. Flach-, Guss-, und Hohlglas
Verbundmaterial	EVA, Acrylate, PU, u.a.	5-10	thermische Verwertung Abtrennung Verbinder, Zellen
Rückseitenabdeckung	Polyester, Aluminium, Flourpolymere, Stahl, Glas	0-10	thermisch bei Polymeren, Metallkreislauf für Metalle, Glasrecycling für Glas
Rahmen	Aluminium, Stahl, PU, PC, u.a.	0-20	thermisch bei Polymeren oder Kunststoffrecycling, Metalle in Metallkreislauf
Anschlussdosen	ABS, PC, PPO, PET, u.a.	0-5	thermische Verwertung, Kunststoffrecycling
Kabel	Kupfer, Polyolefine, synthetischer Kautschuk, u.a.	ca. 1	Metallkreislauf, Kabelrecycling, Elektronikschrottreycling
Dichtmassen	Silikone, Polyacrylate, PE-Schäume, PU	0-10	thermisch
Füllstoffe	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , CaCO ₃ , SiO ₂ , C, u.a.	ca. 1	Füllstoffe, mineralische Zuschläge, Beseitigung
kristalline Solarzellen	Si, Ti, Ag, Sn, Pb, Cu, Ni, Pb, u.a.	5-10	Keramikherstellung, Legierungszuschläge, Solarzellenherstellung
elektrische Verbinder	Cu, Sn, Pb, Al, Ag, u.a.	ca. 1	Metallkreislauf

Tabelle 6 zeigt die Materialzusammensetzung von PV-Modulen gegliedert nach Modul-Technologie. Es wird deutlich, dass die Marktdurchdringung der einzelnen Modul-Technologien die einzusetzenden Recyclingprozesse, aber auch den Output an recycelten Materialien bestimmt.

Tabelle 6: Materialzusammensetzung von PV-Modulen nach Modultechnologie (BINE 2010)

ROHSTOFFE	C-SI (KRISTALLINE SILIZIUMZELLEN)	A-SI (AMORPHE SILIZIUMZELLEN)	CIS (KUPFER-INDIUM-DISELENIID-ZELLEN)	CDTE (CADMIUM-TELLURID-ZELLEN)
	[%]	[%]	[%]	[%]
Glas	74	90	85	95
Aluminium	10	10	12	<0,01
Silizium	3	<0,1	-	-
Polymere	6,5	10	6	3,5
Zink	0,12	<0,1	0,12	0,01
Blei	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Kupfer	0,6	-	0,85	1
Indium	-	-	0,02	-
Selen	-	-	0,03	-
Tellur	-	-	-	0,07
Cadmium	-	-	-	0,07
Silber	<0,006			<0,01

Ob PV-Module gefährliche Substanzen enthalten, hängt ebenfalls von der Modul-Technologie und deren Materialzusammensetzung ab (siehe Tabelle 6). Generell sind gemäß dem AWG 2002 kristalline Si-Module als „nicht gefährliche“ Großgeräte eingestuft. Im Gegensatz dazu sind Dünnschichtmodule als „gefährliche“ Großgeräte eingestuft. Module auf Basis von Siliziumwafern enthalten häufig geringe Mengen an Blei. Grundsätzlich kann das Schwermetall durch unbedenkliche Materialien substituiert werden, was allerdings mit geringen Mehrkosten verbunden ist. Herstellerabhängig kann das Glas zur Erhöhung der Transmission, Antimon (Sb) enthalten. Bei Deponierung des Glases kann Antimon ausgewaschen werden. Weitere potentiell umweltschädigende Bestandteile in PV-Modulen können Siliziumtetrachlorid, Selen oder Schwefelhexafluorid sein.

Aufgrund fortschreitender technischer Entwicklungen wird davon ausgegangen, dass der Materialaufwand für PV-Paneele zukünftig tendenziell abnehmen wird. Kristalline Siliziumzellen, die derzeit rund zwei Drittel der weltweit hergestellten Paneele ausmachen, bestehen zu 90 % aus Glas, Aluminium und Polymer. Dennoch enthalten diese Module auch gefährliche Stoffe, wie Silber, Zinn oder Blei. Dünnschichtmodule bestehen zu rund 98 % aus Glas, Polymer und Aluminium, der Rest entfällt auf Kupfer und Zink sowie Halbleiter bzw. anderen potentiell gefährlichen Stoffen (Weckend et al. 2016). PV-Module aus Perowskit werden derzeit erforscht und sollen vor allem durch einen hohen Wirkungsgrad von mehr als 20 % bestechen. Allerdings enthalten diese Bleiverbindungen, welche als problematisch in der Behandlung von Altmodulen anzusehen sind. Um zukünftig dennoch den vorteilhaften Wirkungsgrad von Perowskit-Modulen zu nutzen und die Umweltbelastung durch das Schwermetall Blei möglichst gering zu halten, wird derzeit am Ersatz von Blei durch Wismut geforscht (Muth 2017).

Vergleichsweise kostengünstig umzusetzen ist die Wiederverwertung der Verbundglaskomponente von kristallinen Si-Modulen. Für Flachglas-Recyclingunternehmen sind nur geringe zusätzliche Investitionen notwendig, um die Verbundglaskomponenten aus PV-Modulen zu rezyklieren. Derzeit geschieht dies meist in Chargen, da bisher nur geringe Mengen verfügbar sind. Zur Entfernung von Polymerrückständen und/oder Metallteilen aus dem Glasbruch stehen gemäß dem Stand der Technik Magnete, Brecher, Siebe, Wirbelstromvorrichtungen, optische Sortierer, induktive Sortierer und Abgassysteme zur Verfügung. Das recycelte Glas enthält dennoch Verunreinigungen mit Polymeren und Metallen sowie Silizium. Daher findet es derzeit gemeinsam mit anderen recycelten Glasfraktionen Einsatz als Wärmeisoliermaterial in der Glasschaum- und Glasfaserindustrie (die hergestellte Glasmischung enthält in etwa 15 bis 20 % PV-Tafelglas) (Weckend et al. 2016).

3.1.3.2 Erdverlegte Infrastrukturen

Die Netzinfrastrukturen für Energie, Wasser und Information sind ein wichtiger Bestandteil des Materiallagers einer Stadt und tragen essentiell zur Daseinsvorsorge bei. Ein Großteil dieser Netzinfrastrukturen befindet sich im Untergrund und stellt nach dem Ende der Nutzung (durch Stilllegung, Funktionsverlust, Technologieentwicklung usw.) eine potentielle Rohstofflagerstätte dar. Insgesamt machen die Materialien in der erdverlegten Infrastruktur nur 1 % des österreichischen Materiallagers aus. Der Anteil von Kupfer liegt jedoch beispielsweise bei 40 % des anthropogenen Kupferlagers (Daxbeck et al. 2006). Derzeit gibt es kaum Informationen zur exakten Lage und der Rückgewinnbarkeit dieser Wertstoffe, obwohl entsprechende Daten bereits bei den jeweiligen Netzbetreiber*innen vorhanden sind (Kral et al. 2017). Für ausgewählte schwedische Städte konnten Kupferlager zwischen 20 und 35 kg pro Einwohner*in, Aluminiumlager von 10 kg pro Einwohner*in und Eisen- bzw. Stahllager von 130 kg pro Einwohner*in ermittelt werden (Krook et al. 2011, Wallsten

et al. 2013). Untersuchungen zum Nutzungszustand der jeweiligen Leitungen zeigten, dass je nach Stadt zwischen 5 % und 20 % des verbauten Kupfers derzeit ungenutzt und damit potentiell rückgewinnbar sind. Im Zuge einer Machbarkeitsstudie wurden für ausgewählte urbane Regionen in Österreich etwas geringere pro-Kopf Kupfermengen von 3 bis 15 kg pro Einwohner*in in der erdverlegten Infrastruktur erhoben, wobei auch der Anteil der stillgelegten Leitungen mit rund 6 % nur halb so groß ist, wie in den untersuchten schwedischen Städten (Kral et al. 2017). Obwohl die österreichischen Zahlen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind und nicht flächendeckend erhoben wurden, ist klar ersichtlich, dass die erdverlegte Infrastruktur auch in Österreich ein relevantes Urban Mining Potenzial beherbergt.

Wie bereits beschrieben, sind es oftmals monetäre Überlegungen, alte Leitungen im Erdreich zu belassen. Einige Studien (Krook et al. 2011, Krook et al. 2015, Wallsten 2015) haben sich daher bereits eingehend damit beschäftigt, unterschiedliche Rückbauvarianten (separater oder integrierter Rückbau) von stillgelegten/ inaktiven Leitungen ökonomisch zu bewerten, um in Folge zu beurteilen, unter welchen Voraussetzungen ein monetärer Nutzen erzielt werden kann. Generell zeigte sich in der Studie von Krook et al. (2015), dass ökonomisch betrachtet, keine der getesteten Rückbauvarianten einen monetären Nutzen bringt, mit der einzigen Ausnahme des integrierten Rückbaus von stark kupferhaltigen Leitungen. Ausschlaggebend für die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung waren vor allem die Rückbauvariante, die Zusammensetzung der Leitungen (Kupfer-/Aluminiumleiter, Papier-/Kunststoffisolierung), sowie die Oberflächenbeschichtung (Asphalt, Pflasterstein, Gras) und Lage (Zentrum, Peripherie) der Trasse bzw. Künette. So variierten insbesondere die Aufgrabungskosten stark in Abhängigkeit von der Straßenoberfläche und -lage. Am höchsten sind diese bei Asphaltoberflächen und Zentrums Lage. Im Vergleich dazu erweisen sich Aufgrabungen auf Grünflächen als kostengünstigste Varianten. Auf der Ertragsseite ist festzuhalten, dass die Erlöse von rückgewonnenen Kupferleitungen die höchsten Gewinne bringen. Krook et al. (2011) heben jedoch schon in ihrer Studie von 2011 hervor, dass der aktuelle Metallpreis für Sekundärmetalle sehr niedrig ist und somit das Bilanzergebnis, und damit das Potenzial für Urban Mining Ansätze, stark vermindert. Ebenso wurde in der Studie von Krook et al. (2015) eine ökologische Bewertung der Rückbauvarianten anhand der Wirkungskategorie „Globale Erwärmung“ durchgeführt, welche zeigte, dass die besten Ergebnisse bei einem integrierten Rückbau von stillgelegten Leitungen (rund 1,2 kg CO₂-Ä/m) zu erzielen sind. Die höchsten Beiträge zur globalen Erwärmung verursachten die separaten Rückbauvarianten mit Asphalt als Oberflächenmaterial (rund 25,0 kg CO₂-Ä/m).

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der in der Studie von Wallsten (2015) hervorgehoben wird, ist die oftmals schwer zu eruiende Lage der erdverlegten Leitungen. Diese Information ist jedoch sehr wichtig für die Betrachtung des Ressourcenpotenzials, sowie der effizienten Planung und Kostenabschätzung des Leitungsrückbaus. Kral et al. (2017) beschäftigten sich mit der Machbarkeit eines Ressourcenkatasters für erdverlegte Ver- und Entsorgungsinfrastruktur in Österreich. Die Grundlage des Ressourcenkatasters bildeten Informationen (vor allem Geoinformationsdaten) von Netzbetreiber*innen sowie der öffentlichen Hand. Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund der Informationslage die Etablierung eines Ressourcenkatasters machbar wäre und damit auch die Realisierung eines nationalen bzw. betrieblichen Ressourcenkatasters. Dieser Ressourcenkataster könnte in Folge auch als strategische Grundlage für Urban Mining von Sekundärrohstoffen aus erdverlegten Leitungen dienen und ein effektives Instandhaltungs- und Rückbaumanagement begünstigen. Ebenso beschäftigte sich eine weitere Studie mit der Erkundung von Urban Mining Potenzialen im Bundesland Steiermark und der gleichzeitigen Etablierung eines Urban Mining

Katasters (Daxbeck et al., 2015). Hierbei wurden Geoinformations- mit Materialdaten verknüpft. Auch diese Studie bestätigt die Machbarkeit eines Urban Mining Katasters.

3.1.3.3 Hochbauten

Fast 50 % des anthropogenen Materiallagers in Österreich befinden sich in Hochbauten (120 Tonnen pro Kopf, (Daxbeck et al. 2009)). Dieses Lager „produzierte“ im Jahr 2009 mehr als 450 kg pro Kopf an Baurestmassen (BMLFUW 2011) und wird zukünftig in zunehmendem Ausmaß als Rohstoffquelle zur Verfügung stehen (Lichtensteiger et al. 2008). Um Gebäude am Ende ihrer Nutzungsdauer möglichst effizient zu bewirtschaften, ist die Kenntnis der Verortung und Zusammensetzung der verbauten Materialien von grundlegender Bedeutung. Entsprechende Untersuchungen wurden beispielsweise für japanische Städte (Tanikawa et al. 2015) oder auch für Wien (Kleemann et al. 2016) durchgeführt. Die Verteilung des Materiallagers über die Stadt ist dabei sehr heterogen und hängt vor allem von der Bebauungsdichte und den jeweiligen Gebäudetypen ab. Die lagespezifische Kenntnis der vorhandenen Materialmengen und ihrer Zusammensetzung stellen in Verbindung mit Prognosen zur zukünftigen Entwicklung des Gebäudebestandes (Stadterweiterung und -verdichtung, Renovierungs- und Erneuerungsvorhaben) die Basis zur Abschätzung zukünftig vorhandener Potenziale für Urban Mining dar (Kleemann et al. 2016). Neben der Betrachtung des Gesamtbauwerkes kommt der Betrachtung einzelner Bauteile wie z.B. Fenster oder Fassaden große Bedeutung zu, da die Wiederverwendung von Bauteilen und die hochwertige Verwertung von Baustoffen (z.B. durch selektiven Rückbau oder Design für Recycling) erhebliche ökonomische und ökologische Anreize für ein verstärktes Urban Mining darstellen (Dechantsreiter et al. 2015).

Neben der Menge an Materialien in bestehenden Gebäuden und Infrastrukturen, stellen Informationen über die Materialzusammensetzung, -qualität und -konzentration, Verortung, Verfügbarkeit, Vergesellschaftung, Alter und Zustand die Grundlage für ein systematisches Urban Mining dar (Lederer et al. 2014, Winterstetter et al. 2016). Die Größe der anthropogenen Materiallager wurde bereits anhand zahlreicher Stoffflussanalysen untersucht (Zeltner et al. 1999, Graedel et al. 2004, Müller 2006, Pauliuk et al. 2013). Es besteht jedoch nach wie vor erheblicher Forschungsbedarf, was die Charakterisierung dieser Materiallager in Bezug auf ihre Nutzbarkeit als Rohstoffquellen betrifft (Winterstetter et al. 2016). Solche Informationen sind auch grundlegend für die ökonomische und ökologische Bewertung von Urban Mining, da die Kenntnis der Lage, des aktuellen Nutzungsstatus bzw. externe Faktoren, wie verfügbare Recyclingtechnologien oder etablierte Sekundärrohstoffmärkte (inkl. Preisentwicklungen) einen wesentlichen Einfluss auf die ökonomische bzw. ökologische Sinnhaftigkeit von Urban Mining haben (Fehring et al. 2014, Krook et al. 2015, Winterstetter et al. 2016). Im Gebäudebereich wurde der materielle Gebäudepass als ein dahingehendes Konzept zur ressourceneffizienten und kreislauforientierten Bewirtschaftung des Gebäudeparks über den gesamten Lebenszyklus vorgeschlagen (Markova et al. 2011). Dabei stellt der materielle Gebäudepass ein System zur Dokumentation der Bauaktivitäten, der eingesetzten Baumaterialien und Einbauten, der Nutzung, sowie von Renovierungs- und Instandhaltungsmaßnahmen dar. Dementsprechend ermöglicht der Gebäudepass am Ende der Nutzungsphase einen optimierten Rückbau, der auf die Weiternutzung, Wiederverwendung und stoffliche Verwertung der enthaltenen Bauteile und Baumaterialien abzielt (Reisinger et al. 2014).

Im Rahmen des Österreichischen Ressourceneffizienz-Aktionsplans (REAP) werden verschiedene Maßnahmen vorgeschlagen, um die Emissionen und den Ressourcenverbrauch des Bausektors zu reduzieren. Die wichtigsten Maßnahmen sind neben der Energieeffizienz von Gebäuden, einer

emissionsärmeren Produktion von Baustoffen oder dem Design-for-Recycling, die Verlängerung der Nutzungsdauer von Gebäuden und ein werthaltiges Recycling von Baurestmassen (BMLFUW 2012). Der effektivste Ansatz, Abfälle aus dem Hochbau zu vermeiden und damit Ressourcen zu schonen, besteht in einer Verlängerung der Lebensdauer von Gebäuden (Thomas et al. 2005, Dechantsreiter et al. 2015). So halbiert beispielsweise die Verdoppelung der Lebensdauer nicht nur den Abfallanfall, sondern auch den Rohstoffbedarf für die Herstellung bezogen auf konstruktive Massenbaustoffe. Dementsprechend ist die Renovierung und Weiternutzung von Alt-Gebäude(teile)n bzw. die Demontage und Wiederverwendung von Bauprodukten meist ressourceneffizienter und umweltschonender als der Abbruch und anschließende Neubau von Gebäuden. Obwohl in Österreich zahlreiche Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Bauwesen gesetzt wurden und der Ressourcenschutz generell einen hohen Stellenwert besitzt, gibt es im Bereich der Weiternutzung und Wiederverwendung von Bauteilen sowie des hochwertigen Recyclings noch ungenutzte Potentiale zur Schonung von Umwelt und Ressourcen.

3.2 Urban Mining: Fallstudien

Ziel der folgenden Fallstudien ist die Bewertung ressourcen- und energieeffizienter Kreisläufe durch Urban Mining.

3.2.1 Fallstudie 1: Photovoltaik

3.2.1.1 Einleitung

Das Recycling von Photovoltaik-Modulen wird für die Recyclingbranche aufgrund eines wachsenden Marktes und dem bevorstehenden Ablauf der Lebensdauer erster Module ab den Jahren 2020 bis 2025 relevant. Daher steigt das Interesse bei Recyclern und Entsorgern für die fachgerechte Sammlung, Aufbereitung und Wiederverwertung der Module. Mit dem Anstieg des weltweiten PV-Marktes wird auch das Volumen der stillgelegten PV-Module in zeitlicher Verzögerung über die Anlagenlebensdauer steigen. Gemäß REN21 (2017), dem „Renewable Energy Policy Network for the 21st Century“ wurde bis Ende 2016 weltweit eine PV-Leistung im Ausmaß von 303 GWp verbaut, bei jährlichen Zuwachsraten zwischen 40 und 50 GWp in den Jahren 2013 bis 2015 und einem Zubau von 75 GWp im Jahr 2016.

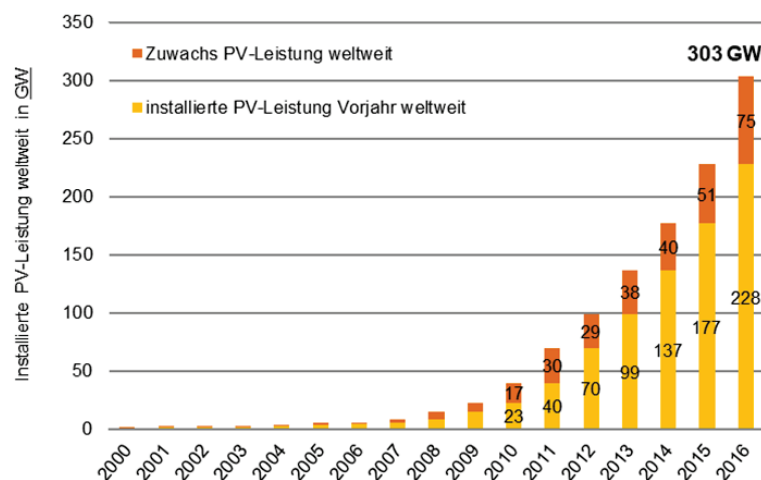


Abbildung 17: Entwicklung der installierten PV-Leistung weltweit bis 2016 (eigene Darstellung auf Basis von REN21 (2017))

Entsprechend dem weltweiten Trend wurden auch in Österreich bedeutende Leistungspotentiale erst ab 2010 umgesetzt. Bis Ende 2016 wurde eine kumulierte PV-Leistung von 1.100 MW installiert, wobei ab 2013 jährlich zwischen 150 und 160 MWp zugebaut wurden. Um, wie geplant, 100 % der österreichischen Stromversorgung durch Erneuerbare zu decken, bedarf es bis 2030 eines weiteren Ausbaus von 9,7 GWp und bis 2050 einer kumulierten Leistung von 26,7 GWp, was ab 2017 mit einem jährlichen Zubau von 600 MWp und ab 2030 von 820 MWp pro Jahr verbunden ist. Die Bedeutung der elektrischen Energie soll dabei zunehmen. Beispielsweise wird angenommen, dass der Mobilitätsbereich und wesentliche Industrieprozesse auf Strombasis umgestellt werden.

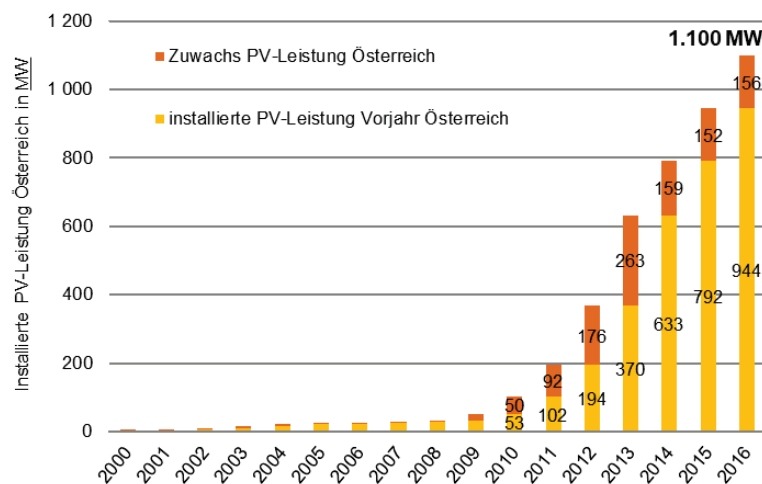


Abbildung 18: Entwicklung der installierten PV-Leistung in Österreich bis 2016 (eigene Darstellung auf Basis von Biermayr et al. (2017))

Einhergehend mit der zukünftig prognostizierten Steigerung der installierten PV-Leistung ist mit einem Anstieg des PV-Abfallaufkommens nach Ablauf der Lebensdauer der Module zu rechnen. Neben den Marktgegebenheiten wird die Auseinandersetzung der Recyclingbranche mit dem Recycling von PV-Modulen unter anderem auch aufgrund des In-Kraft-Tretens einschlägiger Richtlinien auf EU-Ebene vorangetrieben. So unterliegen PV-Module seit 2012 erstmals der EU-Richtlinie 2012/19/EU (WEEE2), die einige relevante Änderungen für die PV-Industrie mit sich bringt. Nicht zu vernachlässigen sind auch die Bestrebungen zur Schaffung einer Kreislaufwirtschaft auf europäischer Ebene, die ebenfalls neue rechtliche Rahmenbedingungen setzt. Details zu den, insbesondere für die PV-Industrie relevanten rechtlichen Ausgangslagen finden sich in Kapitel 3.2 der vorliegenden Case Study.

Im Zuge der Fallstudie 1 wird die effiziente Nutzung bzw. Rückgewinnung von Materialien in Photovoltaik (PV)-Anlagen untersucht. Das Ziel ist, Energie- und Ressourceneinsparungen durch die gezielte Nutzung und Verwertung von PV-Modulen am Ende ihrer Lebensdauer zu untersuchen und darzustellen, welchen Beitrag Urban Mining bzw. die effiziente Nutzung bzw. Rückgewinnung von Materialien aus PV-Anlagen zur Gestaltung ressourcen- und energieeffizienter Kreisläufe leisten kann. Dazu werden unterschiedliche Arten von PV-Modulen (kristalline Module, Dünnschichtmodule) in Hinblick auf potentielle Energie- und Ressourceneinsparungen durch ein Recycling der eingebauten Materialien bzw. Wiederverwendung von Komponenten sowie mögliche Verbesserungen in Bezug auf die Zerlegbarkeit und Verwertbarkeit der PV-Anlagen bewertet. Insbesondere soll analysiert werden, welcher Mehraufwand (Energie, Kosten) bei der Herstellung recyclingfähiger Produkte und Komponenten entsteht (Design-for-Recycling) und inwieweit sich die Kosten senken lassen. In Anlehnung an die Fragestellungen der Studie werden im Rahmen der Fallstudie folgende Fragestellungen behandelt:

- 1A Wo ergeben sich größere Effizienzpotenziale in Bezug auf Material- und Energieeinsatz bei der Verwertung von PV-Anlagen?
- 1B Wie kann das Interesse der PV-Industrie erhöht werden, die Rückgewinnung von Rohstoffen zu erhöhen? Welche Ansätze stehen dafür zur Verfügung?
- 1C Welcher Mehraufwand (Energie, Kosten) entsteht bei der Herstellung recyclingfähiger PV-Anlagen-Elementen? Wie lassen sich die Kosten senken?
- 1D Welche Strategien und Rahmenbedingungen tragen zu einer Optimierung von Kreisläufen im Bereich der PV-Anlagen bei?

3.2.1.2 *Material und Methoden*

Systemdefinition

Ein PV-System setzt sich im Wesentlichen aus den folgenden Komponenten zusammen, wobei sich diese je nach Variante bzw. Ausführung unterscheiden können:

- PV-Modul bzw. -Paneel
- Wechselrichter
- Aufständigung bzw. Unterkonstruktion
- Verkabelung

Hinsichtlich der Fallstudie 1 wird als Systemgrenze im engeren Sinn ausschließlich das jeweilige PV-Modul betrachtet, während in einer erweiterten Systemgrenze ebenso die Balance of System (BOS)-Komponenten wie Unterkonstruktion und Verkabelung enthalten sind. In der erweiterten Systemgrenze sind somit Komponenten unterschiedlicher Lebensdauer enthalten. Während beim Modul von einer Lebensdauer von etwa 25 Jahren ausgegangen werden kann, muss der Wechselrichter erfahrungsgemäß spätestens nach 15 Jahren gewechselt werden. Bei der Unterkonstruktion und der Verkabelung ist hingegen von einer längeren Haltbarkeit von bis zu 40 Jahren auszugehen.

Methoden

Die Beschreibung der Ausgangslage in Kapitel 3.1.3.1 basiert auf einer umfangreichen Literaturanalyse. Im Zentrum steht dabei der Stand der Technik im Bereich der Verfahrensentwicklung für das PV-Modul-Recycling. Ein wesentlicher Aspekt, vor allem auch für die Abschätzung des heutigen und zukünftigen PV-Abfallaufkommens in Österreich, ist dabei die Materialzusammensetzung der eingesetzten Modultechnologien sowie deren prognostizierter Marktanteil. Neben den technischen Herausforderungen in Zusammenhang mit dem PV-Modul-Recycling werden auch die wirtschaftlichen Herausforderungen literaturbasiert beleuchtet. Ein vollständiges Bild der heutigen und zukünftigen Rahmenbedingung für die PV-Recycling-Wertschöpfungskette ergibt sich durch die Betrachtung gesetzlicher Vorgaben auf europäischer sowie nationaler Ebene in Österreich. Der Fokus liegt auf jenen Richtlinien, Verordnungen und Gesetzen, die Einfluss auf das PV-Recycling ausüben bzw. spezifische Vorgaben für eine Recyclingquote enthalten.

Ergänzend zu diesen Desk Research-Aktivitäten wurden im Rahmen der vorliegenden Case Study Interviews mit Vertreter*innen der Recycling- bzw. Abfallwirtschaft, PV-Industrie, öffentlichen Institutionen und Forschungseinrichtungen durchgeführt. Insgesamt wurden 19 Personen persönlich, telefonisch oder schriftlich befragt. Ziel dieser Interviews ist es, Erfahrungen aus der Praxis bzgl. der derzeitigen und zukünftig erwarteten Recyclingtechnologien in die Analyse miteinfließen zu lassen sowie Ansätze für Design-for-Recycling und Design-for-Reuse in diesem Kontext zu erheben. Weiters ist auch die Frage nach den Faktoren, welche die Wirtschaftlichkeit von PV-Recycling bestimmen, Gegenstand der Interviews. Eine Übersicht zu den behandelten Themenkomplexen, ebenso wie eine Auflistung der interviewten Expert*innen findet sich im Anhang. Die Ergebnisse der Interviews fließen in erster Linie in die Kapitel 3, 4 und 5 des gegenständlichen Berichtes ein. Die Potentialabschätzung für den PV-Ausbau in Österreich sowie die zu erwartende Entwicklung des PV-Abfallaufkommens wird quantitativ anhand existierender Prognosen zum PV-Ausbau, des zu erwartenden Marktanteils der Modultechnologien, der durchschnittlichen Lebensdauer und der durchschnittlichen Materialzusammensetzung durchgeführt. Dazu wird auf Literaturdaten zurückgegriffen.

3.2.1.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse basieren auf der kritischen Analyse und Auswertung bestehender Arbeiten zum Thema effiziente Nutzung bzw. Rückgewinnung von Materialien in PV-Anlagen durch Urban Mining, sowie einem strukturierten Austausch- und Diskussionsprozess mit relevanten Akteur*innen zur Identifikation von Optimierungspotentialen. Die Ergebnisse umfassen somit die Auswertung relevanter nationaler und internationaler Studien, konkrete Fallstudien zur Gestaltung optimierter, ressourcen- und energieeffizienter Kreisläufe, Möglichkeiten zur Gestaltung recyclingfähigerer Produkte und Komponenten, Strategien zur Einbindung relevanter Stakeholder*innen, um Anreize für Urban Mining zu setzen und schließlich Empfehlungen für die politische Umsetzung von Urban Mining Strategien.

Sammlung und Behandlung

Am Beginn der Recycling-Kette steht die Sammlung der ausgedienten bzw. defekten PV-Module. Die Abgabe von PV-Altmodulen auf Recyclingplätzen (z.B. Altstoffsammelzentren, Recyclinghöfen, usw.) stellt eine mögliche Variante der Sammlung dar. Dazu bedarf es spezieller Sammelbehälter. In Frage kommen dafür u.a. Kunststoffbehälter auf einer Europalette, Holzpaletten-Behälter, aber auch spezielle Big-Bags. Aufgrund des derzeit noch geringen PV-Abfallaufkommens dauert es unter anderem lange, bis sich ein relevantes Abfallvolumen an einem Sammelpunkt akkumuliert hat. Eine Herausforderung in Bezug auf die Sammlung ist auch die Vermeidung der Vermischung von Dünnschicht-Modulen mit kristallinen Modulen bei der Sammelstelle, bzw. spätestens beim Abtransport. Es muss sichergestellt werden, dass kein Cadmium bzw. andere toxikologisch bedenklichen Stoffe in der Behandlung von unbedenklichen kristallinen Modulen auftreten (Verhinderung der Freisetzung cadmiumhaltiger Stäube) (Fiedler 2016).



Kunststoffbehälter (PV CYCLE)

Holz-Paletten-Behälter

PV Big Bag (take-e-way)

Europalette

Abbildung 19: Mögliche Sammelbehälter für PV-Altmodule (Fiedler 2016)

Die geltenden gesetzlichen Vorschriften sehen vor, dass Altmodule einem befugten Sammler oder Behandler zu übergeben sind, der für die fachgerechte Entsorgung zuständig ist. Die Übergabe der Altmodule an den Sammler bzw. Behandler hat in Österreich aufgrund gesetzlicher Bestimmungen durch den Erst-in-Verkehr-Bringer (österreichische Hersteller, Importeure, Händler und Fernabsatzhändler mit Sitz im Drittland, der direkt an den Letztverbraucher liefert) zu geschehen. In Österreich wird die Entsorgung der Altmodule derzeit von spezialisierten Unternehmen als Dienstleistung angeboten (PV Austria 2018).

Als Beispiel ist hier das Umweltforum Haushalt (UFH) zu nennen, welches sich auf die Entsorgung von Elektro-Altgeräten spezialisiert hat. Das UFH verfügt über 100 Sammelstellen in ganz Österreich. Zusätzlich können Händler, die zu einer Zug-um-Zug Rücknahme der Geräte verpflichtet sind, ein Abholservice in Anspruch nehmen. Auch defekte PV-Module werden angenommen (UFH 2018). Das UFH ist ein Dienstleister für Erst-in-Verkehr-Bringer*innen gemäß der WEEE-Richtlinie. In einem telefonischen Interview mit einer Vertreterin des UFH stellte sich heraus, dass der Rücklauf an PV-Modulen derzeit noch sehr gering ist. Eine merkliche Zunahme der Rücklaufquoten wird ab dem Jahr 2030 erwartet. Zudem besteht in Österreich auch noch kein funktionierender Prozess für das Modul-Recycling (UFH 2018).

Nach Auskunft des OÖ Landes-Abfallverwertungsunternehmen AG (LAVU AG) befinden sich ausgediente PV-Module derzeit nicht auf der offiziellen Annahmelisten. Je nach Anfrage wird jedoch geklärt, ob die Module abgegeben werden können, was vor allem davon abhängt, wer die Kosten der Verwertung trägt. Es gibt auch keine eigene Schlüsselnummer für PV-Module und daher ist auch ein spezifisches Datenmanagement derzeit noch nicht etabliert. Für die Übernahme von PV-Modulen in Altstofflogistikzentren sind nur vereinzelt Daten verfügbar. In einem dieser Zentren in Oberösterreich

wurden im Jahr 2016 in etwa 1.000 kg aus gewerblicher Anlieferung übernommen und mit der SN 35221 Elektrogroßgeräte lt. EAG-VO zugeordnet. Für das Jahr 2017 sowie 2018 wurden bisher noch keine Mengen für OÖ gemeldet (LAVU AG 2018). Auf die Sammlung folgt in der Recycling-Kette die Behandlung der defekten PV-Module. Es existieren bereits mehrere erprobte Recyclingverfahren. Recyclingtechnologien für PV-Module wurden bereits in den letzten 15 Jahren erforscht. Basierend auf diesen Forschungsergebnissen wurden Konzepte für Recyclinganlagen entwickelt, die realisiert werden, sobald die PV-Abfallströme in ausreichender Menge vorliegen, um einen rentablen Betrieb zu gewährleisten.

Beispielsweise wurden umfangreiche Forschungsarbeiten von Solar-Unternehmen wie AEG, BP Solar, First Solar, Pilkington, Sharp Solar, Siemens Solar, Solar International und vielen anderen durchgeführt. Zudem wurden durch Forschungsinstitute verschiedene Recyclingmöglichkeiten für PV untersucht. Beispiele hierfür sind die Brookhaven National Laboratories in den USA, das National Institute of Advanced Industrial Science and Technology in Japan, das Interuniversity MicroElectronics Centre in Belgien und das Energy Research Centre in den Niederlanden, um nur einige Beispiele zu nennen (Sander et al. 2013). Eine wesentliche Herausforderung in der Entwicklung von geeigneten Recyclingprozessen ist die Berücksichtigung von fortschreitenden Zell- und Platteninnovationen. Die Recyclingprozesse müssen nicht nur die Hauptkomponenten wie Glas, Aluminium, Kupfer sowie andere potentielle knappe oder wertvolle Materialien (z.B. Silber, Indium, usw.) in ausreichender Qualität für den Handel am Weltmarkt gewinnen, sondern möglicherweise auch mit geringen Mengen gefährlicher und toxischer Materialien (z.B. Cadmium) umgehen können. Abbildung 20 gibt einen Überblick über bisher erprobte Recyclingverfahren für PV-Module. Wichtig ist, dass die Recyclingverfahren nicht isoliert voneinander zum Einsatz kommen. Vielmehr handelt es sich um eine Prozesskette, die mehrere Verfahren miteinschließt.

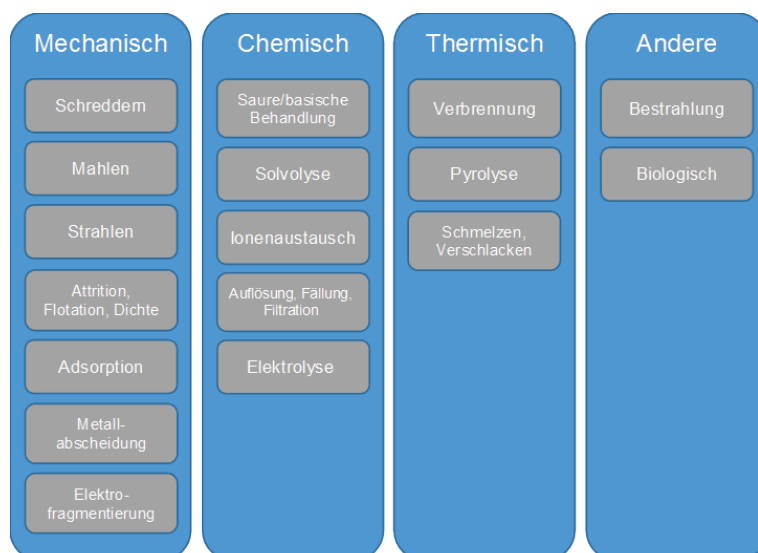


Abbildung 20: Übersicht über bisher erprobte Recyclingverfahren für PV-Module (eigene Darstellung auf Basis von Fiedler (2016))

Vom ursprünglichen Ziel, die Siliziumzellen aus ausgedienten PV-Modulen zurückzugewinnen, sind die Entwickler von PV-Recyclinganlagen und -verfahren abgekommen. Durch die geringe Dicke der Solarzellen (< 180 µm) und der Beschädigung der Module durch Abbau und Transport stellte sich dieser Ansatz aus wirtschaftlicher Sicht als nicht umsetzbar heraus. Daher steht heute die Gewinnung von gereinigtem Solarzellenbruch im Vordergrund. Aus diesem Bruch kann reines Silizium gewonnen

werden, welches nach dem Einschmelzen zu multikristallinen Gussblöcken zu neuen Wafern verarbeitet werden kann. Die Gewinnung des Siliziums aus hochreinem Quarz ist damit nicht mehr notwendig bzw. wird damit teilweise substituiert (Renewableenergyfocus.com 2009). Der eingesetzte Recyclingprozess setzt sich aus einem thermischen, chemischen und einem Zellprozess zusammen. In der thermischen Prozessstufe werden Glas- und Rahmenteile demontiert und sortenrein rezykliert (gemäß dem Stand der Technik von Glas- und Metall-Recyclingverfahren). Die verbauten Kunststoffteile werden in einem 600°C heißen Verbrennungsprozess verwertet, um daraus Bruchsolarzellen wiederzugewinnen. Anschließend wird in einem Ätzverfahren der Solarzellenaufbau entfernt und somit die Waferrückgewinnung ermöglicht (Renewableenergyfocus.com 2009). Ein vereinfachtes Prozessschema wird in Abbildung 21 gezeigt.

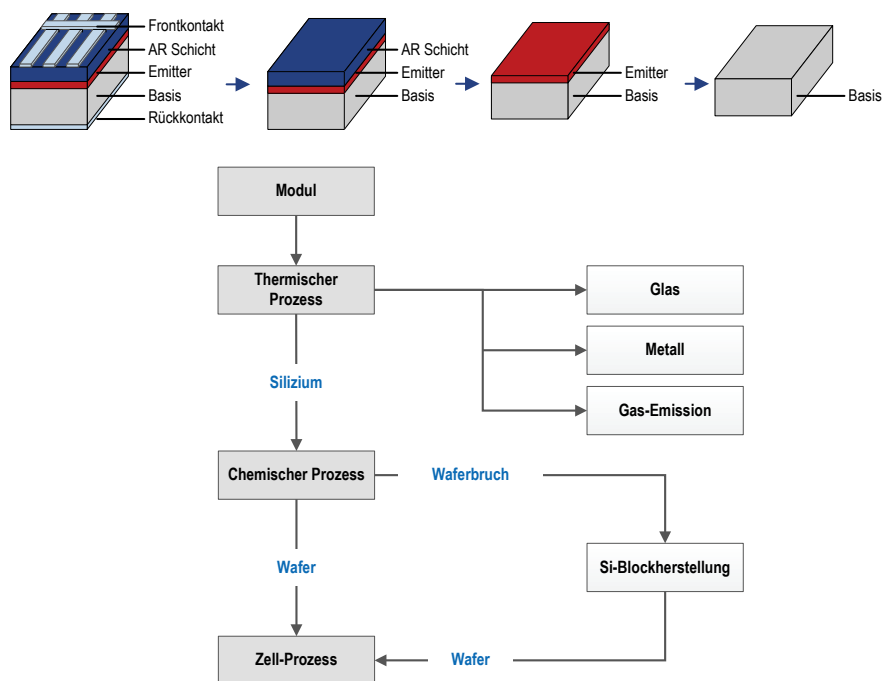


Abbildung 21: Prozessschema zum PV-Recycling (Green Jobs Austria 2013)

Derzeit funktioniert das Recycling von Si-Modulen manuell, indem Glas und Rahmen vom Modul getrennt werden. Übrig bleibt die Verkapselung (Laminat, Si-Zelle, usw.), die der Entsorgung zugeführt wird. Da Glas und Rahmen einen hohen Gewichtsanteil am Modul ausmachen, wird auf diese Weise die von der WEEE-RL geforderte Recyclingquote von 80 % erreicht. Eine Übererfüllung der Recyclingquote durch ein zusätzliches Recycling der Verkapselung wird laut Expert*innen erst dann stattfinden, wenn sich diese wirtschaftlich darstellen lässt. Bestimmend für die Wirtschaftlichkeit sind in diesem Zusammenhang vor allem die Aufarbeitungskosten und die Nachfrage nach Rohstoffen. Auch wenn es ab 2030 zu höheren Rücklaufquoten kommt, werden keine maßgeblichen Änderungen in der Vorgehensweise zum Recycling erwartet, da das manuelle Recycling gut funktioniert und die Recyclingquote erfüllt werden kann (UFH 2018). Es wird jedoch seitens der Expert*innen erwartet, dass sich mit steigenden PV-Abfallmengen einzelne Unternehmen auf das Recycling der Module spezialisieren werden. Derzeit wird das Panel-Recycling beispielsweise durch Unternehmen vorgenommen, die auch Verbundgläser von Autos rezyklieren. Neben Glas und Aluminium aus dem Rahmen wird bei kristallinen Modulen auch Kupfer zurückgewonnen. Bei Dünnschichtmodulen wird vielfach auch der Halbleiter zurückgewonnen. Tabelle 7 fasst diverse Vor- und Nachteile dahingehende einiger Recyclingverfahren von PV-Modulen zusammen.

Tabelle 7: Merkmale von Verfahrenstypen zur Behandlung von PV-Modulen (Green Jobs Austria 2013)

VERFAHREN	OUTPUT-FRAKTIONEN	STÄRKEN	SCHWÄCHEN
Chemisch	Silizium-Wafer, Glas, gebrauchte Chemikalien, Halbleiter, Metallrahmen (vor Behandlung separiert)	Gewinnung von Silizium für Wiederverwendung /-wertung, Rückgewinnung von Halbleitern	Hohe Menge verbrauchter Chemikalien zu entsorgen
Thermisch	Silizium-Wafer, Glas, gebrauchte Chemikalien, Halbleiter, Metallrahmen (vor Behandlung separiert)	Gewinnung von Silizium für Wiederverwendung /-wertung, Rückgewinnung	Energiebedarf, Emissionspotential im Abgaspfad, Abgasbehandlung
Mechanisch (für Dünnschicht-Module)	Glas, Halbleiter, Kunststoffe, Metallrahmen (vor der Behandlung separiert)	Rückgewinnung von Halbleitern, kein Einsatz von Chemikalien	Kontaminierter Sand, potentiell gefährliche Stäube während des Prozesses

Gebäudeintegrierte PV, wie beispielsweise von ertex solar, unterscheidet sich im Aufbau von herkömmlichen PV-Modulen. Es handelt sich dabei um eine sogenannte Glas-Glas-Herstellung: zwischen zwei Glasschichten befindet sich eine thermoplastische Folie mit Siliziumzellen. Daher bedarf es hier eines anderen Recyclingverfahrens, als bei herkömmlichen Si-Modulen. Jene defekten gebäudeintegrierten Module werden zunächst zu einem auf Glas-Recycling spezialisierten Unternehmen gebracht, wo ein Recycling der Glasplatten stattfindet. In einem thermischen Prozess wird anschließend die thermoplastische Folie verbrannt. Das enthaltene Silizium schwimmt dabei oben auf und kann als Schlacke abgeschöpft werden (Ertex-Solar 2018). Tabelle 8 zeigt eine Übersicht an Verfahrensoptionen im Bereich des PV-Recyclings, welche in der Vergangenheit erforscht und erprobt wurden (ohne Anspruch auf Vollständigkeit).

Tabelle 8: Übersicht über in der Vergangenheit erforschte/erprobte Verfahrensoptionen für das Recycling von PV-Modulen (Green Jobs Austria 2013)

	SUNICON	SOLARCYCLE	FIRST SOLAR	LOSER CHEMIE
Standorte	Freiberg Sachsen	Bitterfeld Wolfen	Frankfurt	Langenweißbach
Modultyp für Recycling	Kristalline Module	Kristalline Module, Dünnschicht-Module (CIS, CIGS)	CdTe-Module	Waferbruch, Dünnschicht-Module (CIS, CIGS, CdTe)
Verfahrenstechnik	Kombination thermischer, physikalischer und chemischer Verfahrensschritte	Kombination thermischer, physikalischer und chemischer Verfahrensschritte	Zerkleinerung, Kombination Trocken- und Nassprozesse	Verbundöffnung, chemische Behandlung der Halbleiterschichten
	SAPERATEC	LOBBE	REILING	SOLTECH
Standorte	Bielefeld	Espenhain	Torgau, Marienfeld	
Modultyp für Recycling	Dünnschicht-Module (CIS, CIGS, SdTe)	Kristalline Module, Dünnschicht-Module (CIS, CIGS, CdTe)	Kristalline Module	kristalline Module
Verfahrenstechnik	Trennung von Verklebungen und Beschichtungen mit Hilfe von Tensiden	Kombination aus Kälteschockversprödung und chemisch-physikalischer Behandlung	Rein mechanisch-physikalische Aufbereitungs- und Sortiertechnik	Pyrolyse im Durchlaufofen oder Fließbettreaktor, Waferrückgewinnung
	SOLAR CELLS INC.	SOLAR CELLS INC.	ANTEC SOLAT GMBH	SHOWA SHELL
Standorte				
Modultyp für Recycling	kristalline Module	Dünnschicht-Module (CdTe)	Dünnschicht-Module (CdTe)	Dünnschicht-Module (CIGS)
Verfahrenstechnik	thermische Trennung des Modulverbund	chemische Auflösung und Trennung	Zerkleinerung, thermische Behandlung, Ätzen mit Cl	mechanisch-thermische Trennung des Verbunds, Säurebehandlung, Abschaben des CIGS, Lösungsaufarbeitung
	INTERPHASES RESEARCH	DRINKARD MATALOX INC	BPSOLAR	UNIT UTRECHT
Standorte				
Modultyp für Recycling	Dünnschicht-Module (CIGS)	Dünnschicht-Module (CdTe, CIGS)	kristalline Module	amorphe kristalline Module
Verfahrenstechnik	elektrochemisches, werkstoffliches Recycling	Metallrückgewinnung durch Elektrolyse	Auflösung des Modulverbunds mit Säure, Waferwiederverwendung	Komplettverwertung für Flaschenglas, Wiederverwertung der Substrate inkl. TCO

Als weitere Beispiele für existierende Recyclinganlagen können folgende Unternehmen und Prozesse angeführt werden:

- Becker Umweltdienste GmbH (Chemnitz) (Fiedler 2016)

Das Unternehmen betreibt eine PV-Modul-Recyclinganlage. Die mechanischen Aufbereitungsversuche finden im Industriemaßstab statt und werden wissenschaftlich begleitet. Das PV-Modul-Recycling umfasst verfahrenstechnisch und organisatorisch insgesamt acht Stufen:

- Zwischenlagerung der Module am Standort Chemnitz
- Chargenweise Bearbeitung bei verfahrensoptimalen Losgrößen
- Manuelle Sortierung von Holzpaletten und anderen Störstoffen
- Zerkleinerung der Module unter Einsatz einer Staubabsaugung
- Klassierung der Glasfraktion (< 10 mm)
- Separation der NE-Metallfraktion (entfällt bei rahmenlosen Modulen)
- Trennung von Laminat-Glas-Fraktion und Kunststofffraktion (EBS-Vormaterial)
- Vermarktung der Wertstoffe und Verwertung der Reststoffe

- Exner Trenntechnik GmbH (Langelsheim/Harz) (Exner Trenntechnik 2018)

- Anlagenkapazität: 50.000 t/a für Metallverbunde
- Zielfractionen PV-Recycling:
- Glas: < 200 µm für den direkten Wiedereinsatz in der Glasindustrie
- Aluminium: 1,5 – 20 mm als Desoxidationsaluminium in der Stahlindustrie
- Kunststoffe: 0 – 40 mm als Ersatzbrennstoff
- Nebenmetalle: 0 – 1,5 mm für die Edelmetallschmelze

- Loser Chemie GmbH (Zwickau) (Loserchemie 2018, UFH 2018)

Das Unternehmen hat ein Recyclingverfahren für die Rückgewinnung von seltenen Metallen aus den PV-Modulen (Indium, Gallium, Tellur, Silber, Silizium) und zur Wiederverwertung des in Paneelen verbauten Glases entwickelt. Erwähnenswert in diesem Zusammenhang sind auch die F&E-Tätigkeiten des Unternehmens zur Trennung der Lamine, um eine bessere Glasaufbereitung zu ermöglichen. In einem dreistufigen Verfahren findet zunächst eine Abscheidung von Aluminiumchlorid für die Nutzung in der Abwasseraufbereitung statt, anschließend erfolgt die Silberabscheidung aus der Kunststofffraktion und als dritter Schritt die nasschemische Reinigung des Silizium-Bruchs mit dem Ziel der Rückführung in die Waferproduktion. Nach Auskunft einer Expertin des österreichischen UFH ist die Loser Chemie GmbH insbesondere auf das Recycling von Dünnschichtmodulen spezialisiert.

- SiC-Processing Deutschland GmbH (Bautzen) (Sic 2018)

Das Unternehmen verfügt über Technologien zur Reinigung, Fraktionierung und Konfektionierung von festen und flüssigen Stoffgemischen sowie für die Verwertung von Nebenprodukten. Im Bereich des PV-Recyclings ist das Unternehmen vor allem in der Slurry-Aufbereitung für die Waferindustrie tätig. Die Slurry-Aufbereitung beinhaltet die Aufbereitung von feinkörnigen Feststoffgemischen mit flüssigen Bestandteilen.

- SecondSol GmbH (Meiningen) (Secondsol 2018)

Die SecondSol GmbH ist unter anderem ein Dienstleistungsunternehmen, das neben dem Neubau von PV-Anlagen, insbesondere auch den Nachbau von PV-Anlagen und passenden

Ersatzteilen anbietet, um die Lebensdauer von PV-Modulen zu verlängern. Ebenso bietet das Unternehmen einen Reparaturservice an, zudem können über einen Online-Marktplatz PV-Module gehandelt werden (u.a. Second-Hand). Auf diese Weise ermöglicht das Unternehmen eine Weiternutzung von gebrauchten PV-Modulen und bietet gleichzeitig auch die Reparatur gebrauchter Module sowie die Nachrüstung auf den Stand der Technik bei Kleinelektronik an.

- Seperatec GmbH (Bielefeld) (Saperatec 2018)

Die Seperatec GmbH hat sich darauf spezialisiert, Verbundmaterialien mithilfe von einer Trennflüssigkeit zu trennen. Dazu werden hochspezialisierte Trennflüssigkeiten auf Basis von Chemikalienmischungen exakt auf das jeweilige Verbundmaterial hin entwickelt. In einem ersten Schritt wird das Material zerkleinert, um möglichst viel Angriffsfläche für die Trennflüssigkeit zu schaffen und um das Materialhandling im Prozess zu erleichtern. Anschließend erfolgt im Kernprozess die Behandlung des zerkleinerten Verbundmaterials in der Trennflüssigkeit. Dabei vollzieht sich unter Rühren und Erwärmung der Trennprozess, sodass die Einzelfraktionen („Produkte“) in der Trennflüssigkeit vorliegen. Danach werden die Produkte abgesiebt und die Trennflüssigkeit zurückgewonnen. Nach der Säuberung der Produkte werden diese über bekannte Verfahren sortiert, einzeln gewonnen und zuletzt getrocknet. Das Anwendungspotenzial reicht von Getränkekartons und Verpackungsmaterialien bis hin zu PV-Modulen und Li-Ionen Batterien.

Tabelle 9 zeigt beispielhaft Unternehmen und Vereinigungen, die PV-Recycling betreiben bzw. Altmodule sammeln und damit einen Dreh- und Angelpunkt in der Logistik zum PV-Recycling darstellen. Die Auflistung erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern zeigt nur einen exemplarischen Ausschnitt.

Tabelle 9: Beispielhafte Übersicht über Unternehmen und Vereinigungen die PV-Recycling betreiben bzw. Altmodule sammeln (Green Jobs Austria 2013)

RECYCLING VON PV-MODULEN UND/ODER ELEKTROGERÄTEN		
Deutsche Solar AG	DE	langjährige Forschungs- und Anwendungsaktivitäten im PV-Recycling
First Solar	USA	Anlage zum Recycling von PV-Modulen
Losser Chemie	DE	Integriertes Recycling von PV-Abfall
Reiling Glas Recycling & Co KG	DE	Recycling von Solarglas
saperatec GmbH	DE	Recycling von Verbundmaterialien
Solarworld/Sunicon/Solarcycle	DE	Pilotanlage zum Recycling von PV-Modulen
RECYCLINGINSTITUTIONEN UND SAMMELSTELLEN		
Elektro Recycling Austria	AT	Sammlung und Verwertung von Elektroaltgeräten
Energetica Energietechnik GmbH	AT	Sammelstelle für PV-Module in Ö
European Recycling Plattform	EU	Entsorgung und Behandlung von Elektroaltgeräten
Interseroh Österreich	AT	Sammlung von Elektroaltgeräten
Obrist Austria GmbH	AT	Sammelstelle für PV-Module in Ö
PV Cycle	EU	Sammel- und Recyclingprogramm für PV-Altmodule in ganz Europa
Siblik	AT	Sammelstelle für PV-Module in Ö
Umweltforum Haushalt	AT	Sammlung Elektroaltgeräten
VERE- Verband zur Rücknahme und Verwertung von Elektrogeräten- und Elektronikaltgeräten e.V.	DE	Aktivitäten im Bereich PV-Recycling

Bei PV Cycle handelt es sich um ein Netzwerk, welches europaweit Sammelstellen betreibt. In Deutschland können bis zu 40 alte PV-Module an einem Sammelpunkt von PV Cycle abgegeben werden. Der Abtransport der Module erfolgt ab etwa vier Transporteinheiten, was ca. 80 Modulen entspricht und wird ebenfalls von PV Cycle organisiert. Für das Jahr 2015 meldete das Netzwerk 2.800 Tonnen Abfälle aus ausgedienten Photovoltaikanlagen (Rasch 2016). Insgesamt sind durch das Netzwerk PV Cycle seit seiner Gründung im Jahr 2007 bis Ende 2015 rund 13.300 Tonnen PV-Module zurückgenommen worden. Mehr als die Hälfte der in Europa behandelten PV-Modulabfallmengen sind zwischen 2010 und 2015 in Deutschland generiert worden (Jokic et al. o.J).

Derzeit existieren in Österreich keine auf die Behandlung von ausgedienten PV-Modulen spezialisierte Anlagen (BMNT 2017). In Österreich werden PV-Module derzeit manuell von Metallteilen befreit. Die Glasbestandteile werden dem Gewerbemüll zugeführt. Die Vereinigung PV Austria nennt für Österreich folgende Sammelstellen für Module: Energetica Energietechnik GmbH in Klagenfurt, Obrist GmbH in Zirl sowie die Siblik Elektrik GmbH & Co KG mit der Zentrale in Wien (Photovoltaik Austria o.J.). Laut einem Branchenexperten landeten PV-Altmodule in Österreich bis dato vermehrt im Sondermüll. In Hinblick auf das Netzwerk PV Cycle in Österreich nimmt der Experte an, dass die Module aus Österreich derzeit an Sammelstellen nach Deutschland transportiert werden.

Die Wafer (Siliziumscheiben) in kristallinen PV-Modulen weisen eine Dicke von bis zu 200 µm auf (Halbleiter 2018). Für die Herstellung von Solarzellen werden die Siliziumwafer dotiert, mit Front- und

Rückenkontakten und einer Antireflexschicht versehen – hierzu werden häufig Blei oder Silber verwendet. Im PV-Modul befinden sich die Solarzellen zwischen zwei Laminierfolien. Auf der Rückseite des Moduls ist das sogenannte Backsheet angebracht, welches aus einem Folienverbund besteht, der das PV-Modul von Umwelteinflüssen schützt. Der Folienverbund kann fluorhaltige Kunststoffe enthalten und kann daher ein Risiko für die Umwelt darstellen (Halbleiter 2018). Die Laminierung der Wafer stellt eine wesentliche Herausforderung im PV-Recycling dar, da diese entfernt werden muss. Entweder geschieht dies durch die Delaminierung oder die Entfernung des Verkapselungsmaterials (z.B.: Ethylen-vinyl-acetat). Zur Delaminierung wurden bereits mehrere Verfahren untersucht. Darunter die mechanische Zerkleinerung (Berger et al. 2010, Giacchetta et al. 2013), die thermische Verarbeitung, organische Lösungsmittel (Kang et al. 2012), Pyrolyse und Vakuumstrahlen (Kushiya et al. 2003, Berger et al. 2010), Mikroemulsionen (Marwede et al. 2012) und Ultraschallstrahlung (Kim et al. 2012).

Abbildung 22 zeigt die prognostizierte Entwicklung der Materialanteile in PV-Modulen unterschiedlicher Technologie. Glas ist und bleibt dabei der Hauptbestandteil bezogen auf die Massenanteile. Zukünftig wird erwartet, dass der Glasanteil eher zunehmen und der Anteil an Polymeren eher gleichbleiben wird, wohingegen der Aluminiumanteil in c-Si Modulen abnehmen, aber in CIGS-Modulen leicht ansteigen wird (siehe dazu Abbildung 22).

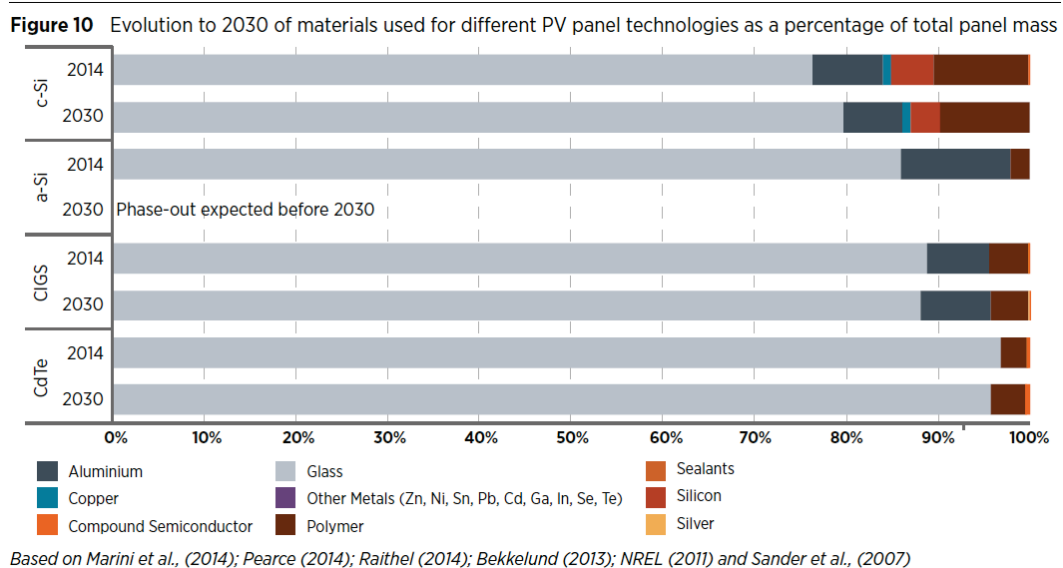


Abbildung 22: Entwicklung der verwendeten Materialien für die Herstellung von PV-Modulen bis 2030 (Weckend et al. 2016)

Aufgrund der derzeitigen Rahmenbedingungen ist ein rentabler Betrieb einer auf PV-Abfall ausgerichteten Recyclinganlage noch nicht möglich. Es wird davon ausgegangen, dass ein automatisiertes Recycling über ein auf die Behandlung von PV-Modulen ausgerichtetes Verfahren ab einem Abfallaufkommen i.H.v. 20.000 t/a wirtschaftlich betrieben werden kann. Für die Kosten der Sammlung werden in der Literatur EUR 210 pro Tonne angesetzt, die Investitionskosten in den Recyclingprozess mit EUR 270 pro Tonne und die Betriebskosten („process cost“) mit EUR 320 pro Tonne. In einem literaturbasierten Basis-Szenario wird davon ausgegangen, dass die Kosten für Logistik und Recycling von PV-Modulen, unabhängig von der Modul-Technologie, bei etwa EUR 175 pro Tonne liegen (Monier et al. 2011). Generell ist es in Österreich auch möglich, PV-Module als Sperrmüll zu entsorgen. Der Preis für die Entsorgung von Sperrmüll liegt zwischen 150 und EUR 200 pro Tonne, was somit der Kostenobergrenze für PV-Recycling entspricht. Laut Angaben eines

Abfallverwertungsunternehmen werden PV-Module zum Preis von gewerblichen Abfall i.H.v. EUR 150 pro Tonne entgegengenommen. Die Kosten für die Aufarbeitung von Si-Modulen liegt momentan bei EUR 65 bis 70 pro Tonne. Für Dünnschicht Module werden die Kosten von Experten mit EUR 130 bis 140 pro Tonne eingeschätzt (UFH 2018). Derzeit sind die Mengen jedoch noch sehr gering. Branchenexpert*innen gehen davon aus, dass der Rest im Sperrmüll landet. In Deutschland liegen die Kosten für die Rücknahme von PV-Modulen bei EUR 70 bis 80 pro Tonne und der Transport der ausgedienten Module von Österreich nach Deutschland kostet EUR 50 bis 70 pro Tonne (Interview 2018).

Andererseits kann der Einsatz von recycelten Materialien die Produktionskosten von PV-Modulen senken. Beispielsweise werden für Wafer, die mit recyceltem Silizium hergestellt werden, signifikant niedrigere Kosten veranschlagt. Die Preise für einige in der PV-Branche eingesetzte Rohstoffe unterliegen teilweise starken Schwankungen. Polysilizium als Rohstoff für die Wafer-Herstellung unterliegt beispielsweise relativ starken Marktpreisschwankungen (siehe Abbildung 3-6). Während in den Jahren 2007 bis 2008 der Marktpreis für Polysilizium bei über 400 \$/kg lag, pendelte sich der Marktpreis im Jahr 2016 bei rund 15 \$/kg ein (Forniés et al. 2016). Derzeit liegt der Spot Price für Polysilizium bei rund 16 \$/kg (Stand Februar 2018) (PV Insight 2018).

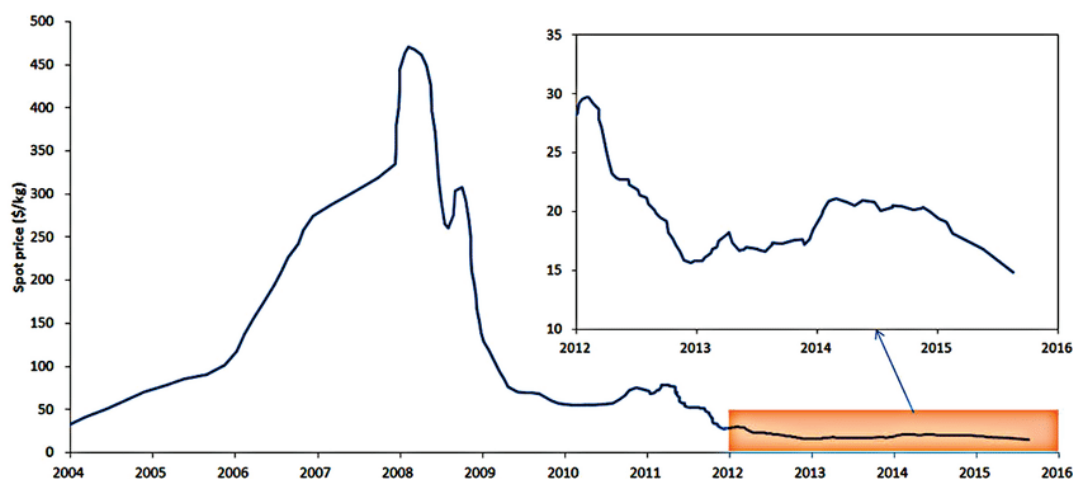


Abbildung 23: Entwicklung des Rohstoffpreises für Polysilizium (Forniés et al. 2016)

Abschätzungen von Branchenvertretern gehen allerdings aufgrund der in Modulen enthaltenen Wertstoffe langfristig von einem bedeutenden Markt für PV-Recycling aus. Prognosen gehen 2050 von einem Wert der wiederverwendeten Materialien in Höhe von 50 Milliarden US-Dollar aus. Dieser Materialzufluss aus Altmodulen könnte die Erzeugung zwei Milliarden neuer PV-Module decken (PV Magazine 2018). In Zusammenhang mit den aus kristallinen Modulen zurückgewonnenen Wertstoffen spielt derzeit Aluminium die wichtigste Rolle. Das Aluminium des Rahmens fällt jedoch nur unrein an, da es mit Kleber aus den Verklebungen behaftet ist. Unreines Aluminium entspricht einem Wert von etwa EUR 1.100 bis 1.200 pro Tonne. Weitere Wertstoffe, wie beispielsweise Kupfer, werden derzeit eher nicht recycelt, da nur geringe Mengen zu erwarten sind und die Kosten des Strombedarfs zum Aufschluss bzw. die Kosten des Verschleißes der verwendeten Maschinen die Erträge aus dem Materialverkauf übersteigen. Verfahren wie Bioleaching oder automatisierte Recyclingverfahren speziell für PV-Module werden nach Einschätzung der Expert*innen auch langfristig noch keine wirtschaftliche Perspektive bieten. Zudem wird angenommen, dass das Zerlegen der Module noch längerfristig manuell geschehen wird. Eine weitere Herausforderung ist die Zusammenarbeit entlang

der Recycling-Wertschöpfungskette. Obwohl ein Flachglasrecycling technisch bereits möglich ist, lehnen diese Unternehmen die Entgegennahme von Modulen ab (Interview 2018).

Die Treibhausgaseinsparung durch das PV-Recycling im Vergleich zur Deponierung wird für eine Behandlungsanlage mit einer Kapazität von 2.000 Tonnen pro Jahr mit 1.600 bis 2.400 Tonnen CO_{2-eq} angegeben. Dies entspricht einer Einsparung von 0,8 Tonnen CO_{2-eq} bis 2,1 Tonnen CO_{2-eq} je Tonne recyceltem PV-Modulabfall (D'Adamo et al. 2017). In der Literatur wird zudem davon ausgegangen, dass die Ökobilanz von PV-Anlagen aufgrund der Wiederaufbereitung verbessert wird. Die reine Verwendung von aus Quarzsand hergestelltem Silizium zur Produktion verlängert die Energy-Pay-Back Time um bis zu das Dreifache (BINE 2010).

Design-for-X

Das Design eines Produktes steht am Anfang des Modells zur Circular Economy (siehe dazu Kapitel 3.1.1). Damit kann sowohl das „Design-for-Recycling“ wie auch das „Design-for-Reuse“ in Zusammenhang gebracht werden. In Anbetracht des Bestrebens auf EU-Ebene zur Gestaltung einer Circular Economy wird dem „Design-for-Recycling und Reuse“ zukünftig eine verstärkte Rolle beim Produktdesign zukommen.

Im Bereich des Produktdesigns existieren mehrere Ansätze, die eine Optimierung auf einer bestimmten Stufe des Produktlebenszyklus zum Ziel haben. „Design-for-Environment (DfE)“ zielt auf eine ökologieorientierte Produktgestaltung ab und stellt ein Tool für die Produktentwickler dar, um kritische Umweltparameter von Produkten bereits während der Entwicklungsphase zu behandeln und deren negativen Umweltauswirkungen zu minimieren. DfE zielt auf eine Minimierung des Einsatzes von gefährlichen Stoffen, Möglichkeiten zur Demontage, der Rückgewinnung sowie das Recycling und der Beseitigung ab. In diesem Prozess müssen auch vorhandene gesetzliche Regelungen in den jeweiligen Teilbereichen berücksichtigt werden. „Design-for-Disassembly (DfD)“, „Design-for-Recyclability (DfR)“ oder aber auch Design-for-Reuse können auch unter DfE zusammengefasst werden. In der Literatur wird auch von „Design-for“-Ansätzen als Überbegriff gesprochen. DfR wie auch „Design-for-Reuse“ entstanden aus der Integration von Umweltaspekten in die bestehenden „Design-for“-Ansätze wie beispielsweise „Design-for Manufacturing (DfM)“ oder „Design-for-Assembly (DfA)“. Abbildung 24 zeigt eine Auswahl an Design-Ansätzen und die Einordnung der „Design-for-Environment“ Ansätze.

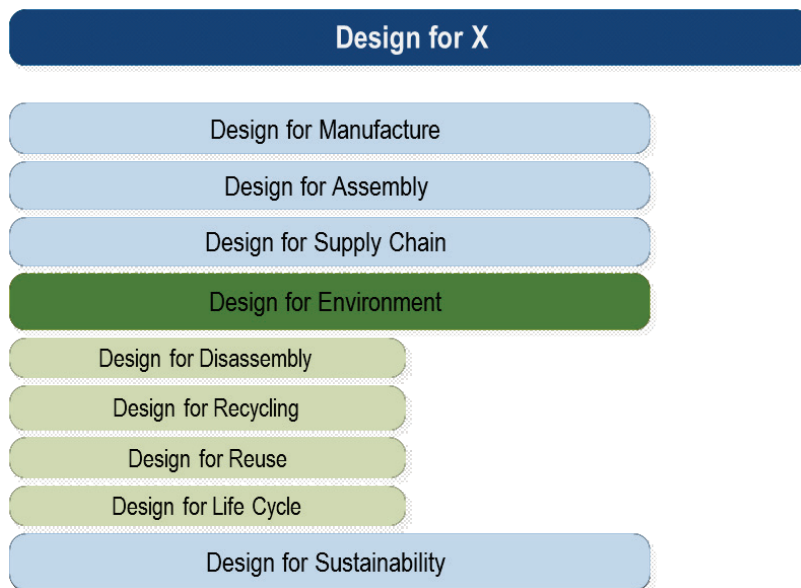


Abbildung 24: Design-for-X Ansätze (eigene Darstellung)

„Design-for-Recycling“ ist ein Ansatz, der im Produktdesign zur Anwendung kommt und darauf abzielt, die Rezyklierbarkeit eines Produktes und seiner Komponenten zu verbessern und den Output aus Recyclingprozessen zu maximieren. Eine der wesentlichen Herausforderungen des Ansatzes liegt im Fehlen von formellen oder auch mathematischen Richtlinien und Berechnungsmöglichkeiten zur Optimierung der Rezyklierbarkeit.

DfR umfasst nicht nur Maßnahmen, die das Zerlegen des Produkts in seine Einzelkomponenten und die Auftrennung von Stoffen vereinfachen sollen, sondern auch Maßnahmen hinsichtlich der Erhöhung der Produktlebensdauer. Zwei wichtige Ansatzpunkte sind einerseits die Anwendung eines modularen Produktdesigns, um Adaptierungen und Aufrüstungen zu ermöglichen, und andererseits die Gewährleistung der Reparaturfreundlichkeit, indem abnutzungsgefährdete Teile gut zugänglich verbaut werden und Ersatzteile erhältlich sind. In der Praxis bereits erprobte DfR-Ansätze in Zusammenhang mit der Produktentwicklung von PV-Modulen sind unter anderem die Verwendung von Schrauben und Druckkontakten zur Gestaltung von Gehäusen (Bsp. Laderegler), um eine Verlötlung zu vermeiden. Dadurch wird das Zerlegen des Gehäuses erleichtert und die Einzelteile können am Ende ihrer Lebensdauer wiederverwendet werden. Zusätzlich wird darauf geachtet, das Gehäuse aus nur einem Material herzustellen, damit ein vereinfachter Recyclingprozess zum Einsatz kommen kann. Auch die Verwendung von optimierten Materialien, die den Einsatz von Zusatzstoffen und -komponenten verhindern, kann als DfR Maßnahme festgehalten werden. Dort, wo es aus technischer Sicht möglich ist, sollten Hardwarekomponenten so gestaltet werden, dass diese weiterverwendet werden können (z.B. durch das Bespielen mit einer anderen/neuen Firmware) (Arranz et al. 2012).

Hinsichtlich des Recycling von PV-Modulen wird in erster Linie die Verklebung der Aluminiumrahmen zum Schutz vor Feuchtigkeit sowie die Einkapselungen aus Ethylvinylacetat (EVA) genannt. Im Rahmen des DfR kann der Einsatz von Thermokunststoffen anstatt der EVA-Einkapselung oder die Anwendung des NICE Modul-Konzepts (keine Verkapselung) das Recycling vereinfachen. Zusätzlich sollte die Verwendung von anderen Dichtmitteln angedacht werden, um das Zerlegen der Aluminiumrahmen einfacher zu gestalten. Auch der Einsatz von Release-Layer (abziehbare Schutzschicht) wird als DfR-Maßnahme für PV-Module angesehen.

Im NICE Modul-Konzept (New Industrial Solar Cell Encapsulation) ist keine Laminierung notwendig. Diese Technologie unterstützt das Recycling der Wafers. Weiters wird die EVA-Einkapselung durch ein Vakuum ersetzt. Dabei steht das Innenleben unter Druck, um einen elektrischen Kontakt zwischen den Zellkontakten und den Metallverbindungen herzustellen ohne Lötverbindungen verwenden zu müssen. Bei DfR-Ansätzen ist oftmals auch ein Trade-off zwischen vereinfachter Rezyklierbarkeit und der Effizienz der Module zu beachten. Forschungen in Japan befassen sich beispielsweise mit der verbesserten Rezyklierbarkeit der Wafers, indem eine Schutzschicht aufgetragen wird. Diese Schutzschicht erhöht jedoch die Reflexion des Sonnenlichts und die Effizienz der Module sinkt (Auer 2015). Auch die Einkapselung bzw. der Verbund an der Rückseite des Materials wird von Expert*innen als problematisch im Zusammenhang mit Recycling angesehen. Das Backsheet als Teil der Einkapselung bzw. des Verbunds kann aufgrund der Laminierung nicht recycelt werden. Zudem erschwert die unterschiedliche Zusammensetzung der Backsheets das Recycling, was laut Experten durch Monomateriallösungen (Polyolefine, schmelz- und ablösbare Materialien) zu lösen wäre. Vor allem der Verzicht auf die Verklebung im Aluminiumrahmen trägt zu einer deutlichen Verbesserung der Recyclingfähigkeit bei. Laut Expert*innen könnten hierbei smarte, reversible Verklebungen (Fluor-basierte Kunststoffe) einen Beitrag leisten, diese sind bereits entwickelt, werden jedoch noch nicht eingesetzt. Im NICE Modul-Konzept (New Industrial Solar Cell Encapsulation) herrscht zwischen Front- und Backsheet Unterdruck, sodass keine Laminierung benötigt und das Recycling des Wafers unterstützt wird (Interview 2018).

Ein weiterer Bestandteil der Verkapselung ist EVA (Ethylvinylacetat), welches nicht recycelt werden kann, da das gummiartige Material nicht zerstörungsfrei vom Verbund gelöst werden kann. Eine weitere DfE-Maßnahme in der Gestaltung von PV-Modulen ist die gesamthafte Reduktion des eingesetzten Materials bzw. das Bestreben einer höheren Materialeffizienz. Wiederverwendung soll vor allem durch Reparaturmöglichkeiten sichergestellt werden. Gemäß der Internationalen Renewable Energy Agency (IRENA) sollte zunächst eine Erhöhung der Materialeffizienz sowie das Reuse der Module angestrebt werden. Recycling stellt eine dritte Option dar, die erst nach Ausschöpfen der zuvor genannten Optionen zur Anwendung kommt (Weckend et al. 2016). Aus Expertensicht kann vor allem der Verzicht auf die Verklebung in den Aluminiumrahmen zu einer deutlichen Verbesserung der Recyclingfähigkeit beitragen. Dabei spielt die Wirtschaftlichkeit eine wichtige Rolle, denn reines Aluminium (ohne Verunreinigungen mit Kleber) kann zu einem Preis von etwa 1.400 €/t abgesetzt werden. Im Gegensatz dazu erzielt verunreinigtes Aluminium einen Marktpreis von 1.100 bis 1.200 €/t.

In Zusammenhang mit Reuse spielen nicht nur technische Maßnahmen eine wichtige Rolle, sondern auch die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle. Beispielsweise können kaputte, aber reparaturfähige PV-Module von den Herstellern zurückgenommen und generalüberholt werden. Diese Module können als „gebraucht“ deklariert werden und zu einem verminderten Marktpreis wiederverkauft werden. Ebenso können funktionstüchtige oder aber überholte Komponenten in einem Second-Hand Markt verkauft werden. Die Entwicklung eines Marktes für gebrauchte PV-Module und Komponenten steht aktuell erst am Beginn. Vereinzelt unterstützen Internetplattformen den Verkauf der gebrauchten Komponenten (z.B. www.seconsol.de, www.pvXchange.com). Plattformen wie SecondSol leisten auch Hilfestellung beim Finden eines geeigneten Ersatzteils für ältere PV-Anlagen. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein gewisser Anteil der PV-Module auch nach Ablauf der Lebensdauer von 25 Jahren noch funktionstüchtig ist, sodass diese nach der nominellen Lebensdauer abgebaut werden und nach einem Qualitätscheck und einer Aufbereitung der Wiederverkauf erfolgt.

Innerhalb der EU strebt die Vereinigung PV Cycle (<http://www.pvcycle.org/services/european-union/>) die Rücknahme und das Recycling unter anderem von PV-Altmodulen in der PV-Industrie an. Die Mitglieder dieser Vereinigung haben eine Erklärung unterzeichnet, die sich zum Ziel setzt, mindestens 65% der seit 1990 in Europa installierten PV-Module zu sammeln und 85% der Altmodule zu rezyklieren. Diese Initiative ist im Wesentlichen aus den Anforderungen der Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik Altgeräte (WEEE2) entstanden, die seit 2014 in Kraft ist und eine Registrierungspflicht für Hersteller, die kostenlose Rückgabe eines Altgeräts bei einer Sammelstelle, Abholung der Altmodule an den Sammelstellen, Entsorgung/ Verwertung nach Stand der Technik und Meldepflicht über Absatzmengen an die nationale Registrierungsstelle vorsieht. Die Organisation PV Cycle bietet die Erstellung richtlinienkonformer Entsorgungskonzepte für PV-Komponenten an. Ein wichtiger erster Schritt zur Vereinfachung des Recyclings (und daher als Design-for-Recycling Maßnahme zu klassifizieren) ist das von PV Cycle vorgeschlagene Labeling der PV-Module. Das Labeling soll einerseits eine Anleitung zum Umgang mit PV-Modulen am Ende ihrer Lebensdauer und andererseits Informationen über die Zusammensetzung der Module für die Recycler enthalten. Vorstellbar ist in diesem Zusammenhang auch die Einrichtung einer Internetplattform mittels der diese Information abgerufen werden können.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass im Bereich des DfR von PV-Modulen in erster Linie die Zerlegbarkeit der Module sowie eine Erhöhung der Materialeffizienz im Vordergrund stehen. Anstatt der Verklebung der einzelnen Schichten werden andere Technologien erforscht, welche die Auftrennung der Module vereinfachen. Ein zweites großes Forschungsfeld ist die Entwicklung von geeigneten Recyclingprozessen sowie die Entwicklung der dazugehörigen Sammel- und Rückgabesysteme. Diese Bestrebungen sind innerhalb der EU unter anderem auch durch die Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik Altgeräte getrieben. Eine weniger große Rolle in der Literatur spielt die Wiederverwendung der PV-Module bzw. deren Komponenten. Bestehende Initiativen zur Wiederverwendung zielen auf das gesamte PV-Modul ab, welches nach Aufbereitung, Reparatur und Qualitätscheck als Second-Hand Ware verkauft werden kann. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Großteil der PV-Module auch nach Ablauf der Lebensdauer von 25 Jahren weiterhin funktionstüchtig ist. Vor dem Hintergrund einer dynamischen PV-Marktentwicklung wurden bereits deutliche Fortschritte hinsichtlich Materialeffizienz erreicht. Dennoch bestehen weitere Möglichkeiten, PV-Module mit weniger Energie- und Materialeinsatz herzustellen. So kann durch den Einsatz von Flussbettreaktoren der Stromverbrauch in der Silizium-Herstellung um 70% im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren reduziert werden. Kurz- bis mittelfristig umsetzbar wären zudem rahmenlose Module sowie Module mit einer reduzierten Glasdicke (Behrendt et al. 2010).

Das Reuse von einzelnen Komponenten eines Moduls (z.B. Wafers, Aluminiumrahmen) wird in der Literatur kaum behandelt, beispielsweise wird der Aluminiumrahmen dem State-of-the-Art Aluminium-Recycling zugeführt. Demnach besteht gerade für innovative Reuse-Modelle Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Im Rahmen der durchgeführten Interviews wurde der Frage nach Ansätzen bzw. Ideen zum „Design-for-Recycling“ nachgegangen. Grundsätzlich erachten die befragten Expert*innen „Design-for-Recycling“ als sinnvoll.

Es wird darauf hingewiesen, dass DfR die Lebensdauer der Module nicht beeinträchtigen darf, etwa durch das Weglassen der Verklebungen. Sollte es zu einer Verringerung der Lebensdauer kommen, muss der ökologische und wirtschaftliche Nutzen eines DfR in Frage gestellt werden. Das heißt, in diesem Zusammenhang muss das Trade-off zwischen „Design-for-Recycling“ und Lebensdauer bzw. Effizienz berücksichtigt werden. Konkrete Motivatoren für das „Design-for-Recycling“ wurden in den

Interviews nicht genannt. Auch in der Literatur finden sich dazu kaum Angaben in Bezug auf das recyclingfreundliche Design von PV-Modulen. Allerdings lassen sich aus der Literatur einige Faktoren ableiten, die durchaus als Motivatoren für das „Design-for-Recycling“ von PV-Modulen – nicht nur für das Recycling im Allgemeinen – gewertet werden können (Choi et al. 2010):

- Steigende Rohstoffpreise: Es kann angenommen werden, dass bei einem starken Anstieg des Marktpreises für in PV-Modulen eingesetzte Rohstoffe, Hersteller eher bestrebt sein werden, die Komponenten so zu gestalten, dass die Primärrohstoffe nach dem Recycling wieder als Sekundärrohstoffe in guter Qualität zur Verfügung stehen.
- Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Recyclingverfahren: Eine Vereinfachung der Materialrückgewinnung kann zu einer Verringerung der Kosten beitragen. Die Frage, inwieweit PV-Hersteller auf etwaige Recyclingverfahren im Design der Module eingehen, muss in der vorliegenden Fallstudie offenbleiben. In diesem Zusammenhang kann ein Push-Effekt bezogen auf mögliche Rahmenbedingungen angenommen werden.
- Gesetzliche Vorgaben: Auch in diesem Bereich sind Ansatzpunkte wie beispielsweise Verpflichtungen, auf bestimmte Stoffe in der Erzeugung zu verzichten (z.B. zum Schutz der Gesundheit und Umwelt) und somit das Recycling zu vereinfachen (z.B. Schwermetalle) denkbar oder die Hinterlegung von Aufbau- und Zerlegeplänen von Modulen sowie eine Stoffinventarisierung, um ein zielgerichtetes Recycling der Module zu ermöglichen.

DfR spielt derzeit noch eine untergeordnete Rolle am PV-Markt. Ein wesentlicher Faktor dafür ist, dass die Mengen an Altmodulen bis dato gering sind, sodass sich noch kein Recyclingmarkt etabliert hat. Folglich existieren auch nur wenige Ansätze im Bereich des „Design-for-Recyclings“. Langfristig kann sich diese Notwendigkeit ergeben, indem Methoden entwickelt werden müssen, um das Recycling mit steigendem Aufkommen an Altmodulen kosten- und zeiteffizient durchführen zu können. Die für Elektro-Altgeräte geforderte Recyclingquote werden bei PV-Modulen bereits heute schon erreicht, indem das verbaute Glas sowie der Aluminiumrahmen nach dem Stand der Technik rezykliert werden. Damit ist für die Hersteller die Motivation geringer, konkrete DfR-Maßnahmen umzusetzen. Strengere Recyclingquoten bzw. spezifische Vorgaben zum Recycling bestimmter Materialien aus PV-Altmodulen könnten zu einem Fortschritt im DfR führen.

DfR ist zudem heute kein verkaufsrelevantes Argument für die Vermarktung von PV-Modulen. Ausschlaggebend für die Entscheidung des Konsumenten für PV-Module sind die Anschaffungskosten und die Leistung. Ebenso ist der Einsatz von Sekundärrohstoffen bei der Produktion von neuen PV-Modulen kein Verkaufsargument. In diesem Zusammenhang besteht eventuell die Gefahr, dass der Konsument PV-Module mit einem spezifischen Anteil an Sekundärrohstoffen mit Skepsis gegenübersteht. Es ist daher kurz- bis mittelfristig kein Push seitens der Konsumenten in Richtung DfR zu erwarten. Langfristig ergibt sich durch gezielte, bewussteinbildende Maßnahmen die Option, die Konsumenten zu sensibilisieren und DfR für PV-Modulen voranzutreiben. Das Recycling von kristallinen PV-Modulen kann als relativ unproblematisch hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung angesehen werden. Daher besteht auch hier zurzeit nicht zwingend die Notwendigkeit DfR hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung zu betreiben. Mit steigendem Aufkommen von ausgedienten Dünnschichtmodulen kommt es zu einem Anstieg von Problemstoffen im Recyclingprozess (z.B. Schwermetalle). Langfristig gesehen können dadurch verstärkt DfR-Ansätze zur Veränderung der stofflichen Zusammensetzung der Dünnschichtmodule resultieren.

Potentialabschätzung

Wie bereits an anderer Stelle ausgeführt, sind derzeit nur geringe jährliche PV-Abfallmengen vorhanden, wobei ab dem Jahr 2030 mit dem Anfall größerer Mengen gerechnet werden kann. Die Abfallmengen setzen sich dabei aus jenen Modulen zusammen, die am Ende ihrer Lebensdauer angelangt sind sowie beschädigten Modulen innerhalb der nominellen Lebensdauer. Im Jahr 2015 erfasste das PV Cycle-Netzwerk 2.800 t. Erst ab dem Jahr 2020 wird mit dem Anfall größerer Mengen gerechnet. Ein österreichischer Brancheexperte geht davon aus, dass in etwa 15 Jahren mit hohen Modul-Abfallmengen zu rechnen ist. Ebenso wird davon ausgegangen, dass in den nächsten 15 Jahren kristalline Module den Markt beherrschen werden. Hinsichtlich ihrer Materialzusammensetzung sind kristalline Module im Vergleich zu Dünnschichtmodulen als wenig bedenklich einzustufen, da diese keine gefährlichen Stoffe wie Cadmium oder Tellur enthalten. Als Schaden an den PV-Modulen war bisher in erster Linie Glas- oder Rahmenbruch durch eine mechanische Einwirkung, meist durch unsachgemäßen Transport, zu beobachten. Grundsätzlich muss ein Modul mit Glasbruch nicht sofort entsorgt werden, denn solange die Zellverbindungsbahnen nicht beschädigt sind, erbringt das Modul noch immer eine elektrische Leistung. Allerdings kann es durch die Beschädigung der Glasschicht zum Eintritt von Feuchtigkeitsschäden im Glas-Zellen-EVA-Rückseitenfolien-Verbund kommen. Es folgt ein Kurzschluss bzw. ein Isolationsfehler. Insofern verkürzt eine Beschädigung des Glases die Modullebensdauer deutlich. Im Falle des aktuell vertriebenen Moduls unter dem Markennamen „Simon“, einer Insellösung mit einer Leistung von 150 Wp, werden die beschädigten Module entsorgt. Der am Modul angebrachte Wechselrichter wird, sofern machbar und funktionstüchtig, demontiert und an einem anderen Modul montiert. Die Entsorgung dieser Module erfolgt derzeit als Sondermüll. Die defekten Module können dem Hersteller (energetica Energietechnik GmbH) zurückgesendet werden. Aber da das Unternehmen (Mitglied von PV Cycle) fast keine defekten Module zurückerhält, hat es sich bisher nicht gelohnt, die Module zur Sammelstellen von PV Cycle zu transportieren. Generell zeigt die Erfahrung der Expert*innen, dass nur wenige defekt waren und es bei ebenso wenigen zu Transportschäden kam (Interview 2018). Auch andere Branchenexperten geben sehr geringe Reklamationsraten bei den verkauften Modulen an, selbst langfristig scheinen die Reklamationen während der Lebensdauer eine untergeordnete Rolle zu spielen (z.B. von 300 verkauften Anlagen nur eine Reklamation). Folglich ist davon auszugehen, dass die Anforderungen an die Entsorgung neuer, defekter Module bzw. Reklamationen im Laufe der Lebensdauer eher gering sind und der Anfall an Modul-Abfall erst am Ende der Lebensdauer der Module signifikant steigen wird. Möglicherweise ergibt sich dennoch ein zunehmendes PV-Abfallaufkommen aus Modulen vor Ende der angenommenen Lebensdauer (25 Jahre) aufgrund schlechterer Qualität der häufig verbauten asiatischen Module. Diese weisen aus Kostengründen oft eine schlechtere Materialperformance auf, sodass von einer geringeren Lebensdauer auszugehen ist (energetica Energietechnik GmbH 2013).

Im nachfolgenden Abschnitt findet eine Abschätzung des zu erwartenden PV-Abfallaufkommens für Österreich bis zum Jahr 2075 statt. Die Abschätzung erfolgt zum einen für ein Business-as-Usual Szenario (BAU-Szenario, Szenario 1), bei dem von einem gleichbleibenden Zubau der installierten PV-Leistung i.H.v. 164 MW/a (Mittelwert des jährlichen Zubaus in den Jahren 2012-2016 gemäß PV-Austria) ausgegangen wird. Dem jährlichen PV-Zubau wird ein Anteil von 3 % aufgeschlagen, um PV-Module aus Bruch und Ausschuss zu berücksichtigen (Bilimoria et al. 2013). Zum anderen wird ein zweites Szenario (Roadmap 2050, Szenario 2) unter Berücksichtigung der Prognose der installierten Ausbauleistung gemäß der Technologie-Roadmap für PV in Österreich skizziert. Im Jahr 2030 sollen gemäß der Roadmap insgesamt 9.700 MW PV-Leistung und im Jahr 2050 insgesamt 26.700 MW PV-Leistung installiert sein. Mit 26.700 MW ist ab 2050 auch der Maximalbestand der in Österreich installierten PV-Leistung erreicht (Fechner et al. 2016). Die Masse der PV-Module wird nach Taetow

(2013) mit 100 bis 125 Tonnen/MW angenommen. Im Durchschnitt ergibt sich daraus ein Modulgewicht von rund 113 Tonnen pro installiertem Megawatt (Taetow 2013). Zudem wird angenommen, dass das Gewicht der PV-Module je installiertem Megawatt jährlich um 1 % abnimmt. Darin spiegelt sich eine Lernrate hinsichtlich Materialeffizienz wieder. Die Lebensdauer der PV-Module wird für die Abschätzung gemäß Herstellergarantien mit 25 Jahren angenommen.

Ergebnisse BAU-Szenario

Im Business-Usual-Szenario zeigen sich ab 2038 die höchsten PV-Abfallpotentiale, was auf den zunehmenden Ausbau 25 Jahre zuvor im Jahr 2013 zurückzuführen ist (siehe Abbildung 25). Je nach tatsächlicher Lebensdauer (25 Jahre +/-) wird sich dieser Spitzenwert auf einige Jahre vor und nach 2038 verteilen. Innerhalb weniger Jahre steigt die jährliche PV-Abfallmenge stark an und pendelt sich im Jahr 2040 bei ca. 18.000 t/a ein. Ab 2042 sinkt diese Abfallmenge kontinuierlich, da ab diesem Zeitpunkt der Zubau an PV-Leistung genau jener Leistung entspricht, die aufgrund des Erreichens der Lebensdauer ausscheidet.

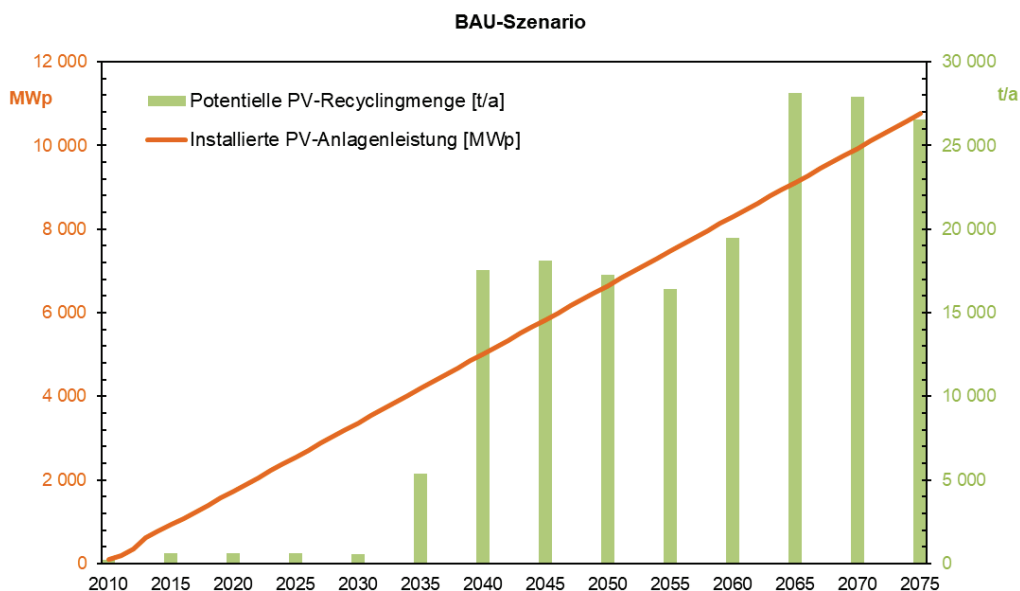


Abbildung 25: BAU-Szenario: zu erwartende installierte PV-Leistung und PV-Abfall bis 2075

Ergebnisse Szenario – Roadmap 2050

Abbildung 26 zeigt die Ergebnisse zur installierten PV-Leistung und den zu erwartenden PV-Abfall für das Szenario Roadmap 2050. Auch in diesem Szenario zeigen sich ab dem Jahr 2038 die höchsten PV-Abfallpotentiale, was mit dem zunehmenden Ausbau ab 2013 zusammenhängt. Ab dem Jahr 2050 wird nur mehr so viel PV-Leistung installiert, um eine gesamte installierte Leistung von 26.700 MW konstant zu halten. Es wird somit nur mehr jene Leistung im System ersetzt, die aufgrund aus dem System ausgeschiedener Module (Lebensdauer erreicht) wegfällt. Die Menge erhöht sich gemäß Szenario somit nicht mehr.

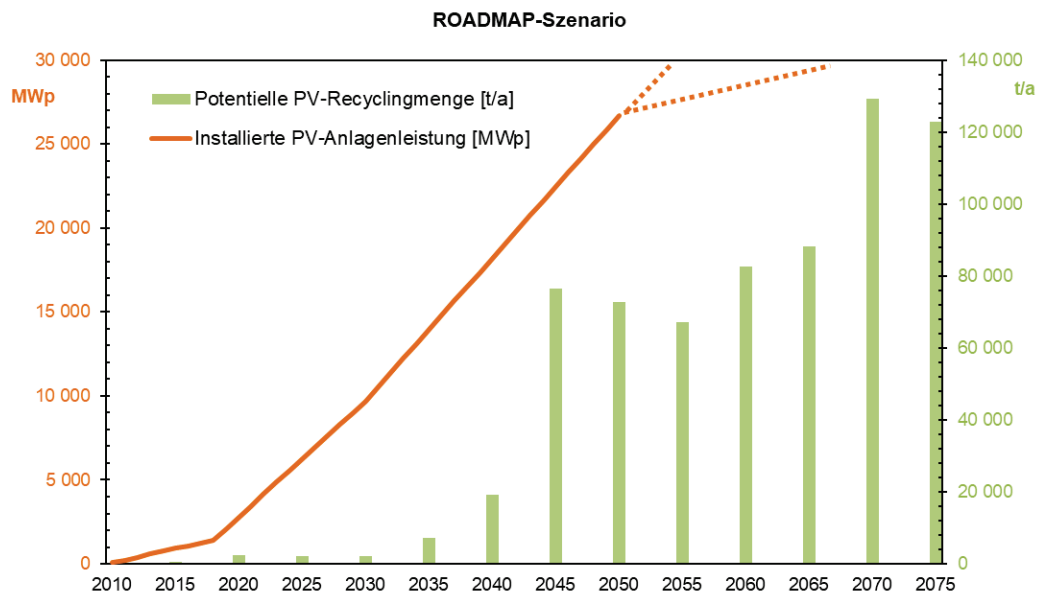


Abbildung 26: Szenario Roadmap 2050: zu erwartende installierte PV-Leistung und PV-Abfall bis 2075

3.2.1.4 Ansätze für Urban Mining: Herausforderungen, Anreize und Empfehlungen

Herausforderungen

Es kann festgehalten werden, dass nur durch eine optimierte Logistik am Beginn der Recyclingkette auch hohe Verwertungsquoten erzielt werden können. Daher stellt die getrennte Sammlung nach Modultechnologien (kristalline und Dünnschicht-Module) eine zentrale Herausforderung dar, die mittels der Etablierung von geeigneter Infrastruktur und Logistik umgesetzt werden kann. Ein Monitoringsystem, vor allem an der Schnittstelle zwischen Sammlern und Behandlern kann hierzu einen wichtigen Beitrag leisten. Damit die Sammelsysteme schlussendlich auch in Anspruch genommen werden, bedarf es zukünftig einer verstärkten Öffentlichkeitsarbeit mit dem Ziel, (betroffene) Anlagenbesitzer über die Möglichkeiten bezüglich vorhandener Sammelsysteme zu informieren. Übergeordnetes Ziel zukünftiger Recycling-Bestrebungen ist neben hohen Rückgewinnungsraten auch eine hohe Qualität selbst für Materialien in geringen Mengen.

Zusammenfassend können folgende Punkte festgehalten werden, die für die Gestaltung zukünftiger PV-Paneel-Abfallrecyclingsysteme unabhängig von der verwendeten PV-Technologie zu berücksichtigen sind:

- Schäden am PV-Paneel sind in der Abbau-, Sammel- und Transportphase zu vermeiden. Es sind geeignete Sammelsysteme einzusetzen, u.a. auch um Rohstoffdiebstahl zu verhindern.
- Eine separate Sammlung und Bereitstellung nach Modultypen ist Voraussetzung für ein funktionierendes Recycling und erfordert geschultes Personal.
- Eine optimierte Logistik im Vorfeld ist eine wesentliche Voraussetzung für das Erzielen von hohen Verwertungsquoten.
- Die Rückgewinnung von Wertstoffen, seltenen und höchstgefährlichen Materialien sollte nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten maximiert werden.
- Verwendung einer Kennzeichnung, um das PV-Paneel eindeutig identifizieren zu können.
- Die Kennzeichnung sollte auch Informationen zu Materialzusammensetzungen enthalten, die für den Recycling- und Verwertungsprozess relevant sind.

- Recyclingfreundliches Paneel-Design.
- Laufende F&E-Tätigkeiten sind notwendig, um hinsichtlich der Recyclingprozesse mit der Marktentwicklung Schritt halten zu können.
- F&E hinsichtlich der Recyclingprozesse sollte zügig umgesetzt werden und Investitionen in neue Prozesse angestrebt werden.
- Entwicklung neuer Verwendungsmöglichkeiten für neue Output-Fraktionen bzw. rezyklierter Materialien.
- Die Ausbeute an Materialien aus dem Recyclingprozess ist auf Basis des aktuellen Stands der Technik nach Kosten und Nutzen zu optimieren.
- Ökobilanzierung bzw. Life Cycle Assessment können als begleitende Tools zur ökologischen Bewertung von Recyclingprozessen eingesetzt werden.
- Einsatz von Monitoringsystemen, vor allem an den Schnittstellen im Recyclingkreislauf.
- Schaffung von einheitlichen Qualitätsstandards und Managementsystemen entlang der Recyclingkette.
- Öffentlichkeitsarbeit, um Sammelsysteme dem betroffenen Anlagenbesitzer nahe zu bringen.

Bestrebungen, ein Produktrecycling zu etablieren, das die PV-Anlagen wieder in Stand setzt bzw. „generalüberholt“, haben sich als wenig erfolgreich herausgestellt, da Baugruppen älterer Module nicht mit neuen Modulen kompatibel sind. Somit gestaltet sich der Austausch defekter Bauteile als schwierig bis unmöglich. Daher haben sich bis dato stoffliche und thermische Verwertungslösungen am Markt und in der Forschung und Entwicklung durchgesetzt. Die technischen und organisatorischen Herausforderungen sind wesentliche Einflussfaktoren für die wirtschaftliche Umsetzung eines PV-Modul-Recyclings. Derzeit sind noch zu geringe Mengen an PV-Abfall am Markt verfügbar, als dass sich Verwertungslösungen großtechnisch am Recyclingmarkt wirtschaftlich etabliert hätten. Die wirtschaftliche Rentabilität wird dabei von mehreren Faktoren beeinflusst:

- Anlagenbau, Anlagengenehmigung, Anlagenbetrieb
- Aktuelles Rohstoffpotential der Module
- Aktuelles Aufkommen an PV-Altmodulen zur Entsorgung
- Logistikaufwand zur Anlieferung der Module
- Zustand/Qualität der zur Verwertung stehenden Module
- Schadstoff- und Gefahrenpotentiale

Hinzu kommt als spezielle Herausforderung, dass es sich beim PV-Recycling um eine relativ junge Industriesparte handelt. Mehrere Variablen, die die Wirtschaftlichkeit bestimmen, sind daher noch nicht vollständig geklärt bzw. können noch nicht auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Dennoch kann angenommen werden, dass der PV-Recyclingmarkt zukünftig zunehmen wird und dadurch neue Chancen für Unternehmen entlang der PV-Wertschöpfungskette entstehen. Aufgrund der bereits dargestellten rasanten Steigerung der prognostizierten Abfallmengen ist das PV-Recycling ein bedeutender Wachstumsmarkt der nächsten Jahre bzw. Jahrzehnte.

Aus wirtschaftlicher Sicht kann die fortschreitende Etablierung eines PV-Recyclingsektors auch zur Schaffung von Arbeitsplätzen beitragen. Bereits heute kann die Etablierung von Reparaturnetzwerken beobachtet werden, wobei hier vor allem niedrigqualifizierte Arbeitsplätze adressiert werden. Die

Sammlung, Logistik und Behandlung von PV-Modulen ist bereits Gegenstand der Normenentwicklung auf europäischer Ebene. Ziel ist die Entwicklung spezifischer Behandlungsstandards innerhalb der Europäischen Union. Die Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE2) war bis Februar 2014 in nationales Recht zu überführen. Seit Februar 2014 sind Unternehmen mit den sich aus der WEEE2 ergebenden Anforderungen für den Umgang mit PV-Altmodulen konfrontiert.

Weiters haben die Mitgliedsstaaten eine dem aktuellen Stand der Technik entsprechende Verwertung der PV-Altmodule durch die Hersteller*innen oder einem im Namen des Herstellers handelnden Dritten sicherzustellen. Im Jahr 2019 ist eine Sammelquote i.H.v. 65 % des Durchschnittsgewichts der Elektro- und Elektronikgeräte, die in den drei Vorjahren in Verkehr gebracht wurden im jeweiligen Mitgliedsstaat vorgesehen. Alternativ dazu gilt eine Sammelquote von 85 % der auf dem Hoheitsgebiet des Mitgliedsstaates anfallenden Elektro- und Elektronik-Altgeräten. In Österreich ist dafür die Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH zuständig. Kennzeichnend für die WEEE-Richtlinie ist der gewählte Recyclingansatz und dieser soll folgendes gewährleisten:

- Potenziell schädliche Substanzen (z. B. Blei, Cadmium, Selen) werden während der Behandlung entfernt.
- Seltene Materialien (z. B. Silber, Tellur, Indium) werden zurückgewonnen und für die zukünftige Verwendung verfügbar gemacht.
- Materialien mit hohem Energiegehalt (z. B. Silizium, Glas) werden recycelt.
- Recycling-Prozesse berücksichtigen die Qualität des zurückgewonnenen Materials (z. B. Glas).

In Österreich wurden die Anforderungen der WEEE2-Richtlinie in die Elektroaltgeräteverordnung (EAG-VO) implementiert. Gemäß dieser Verordnung gelten PV-Module nicht als Elektro- und Elektronikgeräte für Haushalte, sondern fallen unter Elektro- und Elektronikgeräte für gewerbliche Zwecke. PV-Module, die vor dem 1. Juli 2014 in Verkehr gesetzt wurden, sind von den Hersteller*innen unentgeltlich zurückzunehmen, wenn diese durch ein Neugerät ersetzt werden. Für Module, die nach dem 30. Juni 2014 in Verkehr gebracht wurden, gilt die unentgeltliche Rücknahmepflicht bedingungslos. Seit dem 1. Jänner 2016 haben sich Hersteller*innen von PV-Modulen gem. § 22 Abs. 1 AWG 2002 in einem Register einzutragen, für 2014 und 2015 entfällt diese Pflicht. In Anhang 2b der EAG-VO ist die Verwertungsquote in Österreich für PV-Module wie folgt festgesetzt:

- Gültig von 15. August 2015 bis 14. August 2018: Die Verwertungsquote ist mit 80 % des durchschnittlichen Gewichts je Gerät festgelegt. Die Wiederverwendungs- und Recyclingquote für Bauteile, Werkstoffe und Substanzen ist mit 70 % definiert.
- Gültig ab 15. August 2018: Die Verwertungsquote ist mit 85 % des durchschnittlichen Gewichts je Gerät festgelegt. Die Wiederverwendungs- und Recyclingquote für Bauteile, Werkstoffe und Substanzen ist mit 80 % definiert.

Die EU-Richtlinie 2011/65/EU (RoHS) enthält Vorgaben für die Beschränkung der Verwendung von gefährlichen Stoffen in Elektro- und Elektronikgeräten zum Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt. Die Ökodesign-Richtlinie (2009/125/EG) hat zum Ziel, einen Rahmen für die Festlegung gemeinschaftlicher Ökodesign-Anforderungen für energieverbrauchsrelevante Produkte zu schaffen. Ökodesign-Parameter gemäß der Richtlinie betreffen den gesamten Produktlebenszyklus von den eingesetzten Rohstoffen, über die Fertigung und Nutzung bis hin zur Verwertung bzw. Entsorgung. Die EU prüft derzeit die Aufnahme von PV-Paneele und Wechselrichtern in den Geltungsbereich der

Ökodesign-Richtlinie. Die Untersuchungen dazu starten im Jahr 2018 und es wird davon ausgegangen, dass diese 18 bis 24 Monate dauern werden. Bei einer Entscheidung für die Aufnahme in die Ökodesign-Richtlinie folgen Konsultationen mit Interessensgruppen aus der PV-Industrie mit dem Ziel, Anforderungen für die Geräte zu entwerfen. Im Anschluss daran muss es Konsultationen mit der Welthandelsorganisation geben, da die Ökodesign-Richtlinie auch für in die EU importierte Produkte gilt. In diesem Zusammenhang kann es mittel- bis langfristig zu neuen Anforderungen für die PV-Industrie kommen.

Dem aktuellen Kenntnisstand zu Folge wird bzw. muss das End-of-Life-Management zukünftig ein integraler Bestandteil der PV-Wertschöpfungskette werden. Aufgrund der in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Materialzusammensetzung von PV-Modulen kann durch effizientes Recycling eine nicht unerhebliche Menge an Rohstoffen zurückgewonnen werden, um entweder in der Erzeugung neuer PV-Module oder in anderen Herstellungsprozessen Anwendung zu finden. Schätzungen gehen davon aus, dass der Wert der zurückgewonnenen Rohstoffe bis 2030 kumuliert 450 Mio. USD erreichen kann. Nicht berücksichtigt ist dabei der technische Fortschritt, der eine verbesserte Materialeffizienz bei neu erzeugten PV-Modulen unterstützt. Wesentliche Voraussetzung für die Etablierung einer funktionierenden Recycling-Wertschöpfungskette ist die Zusammenarbeit unterschiedlichster Interessensgruppen wie Hersteller*innen, Händler*innen, Systembetreiber*innen, Versorgungsunternehmen, Kommunen, Abfallentsorgungsunternehmen sowie Konsument*innen. Zudem ist auch die Akzeptanz zukünftiger PV-Panel-Abfallmanagementsysteme innerhalb dieser Interessensgruppen zu gewährleisten. Aufgrund gesetzlicher Vorgaben zum Thema PV-Recycling sehen sich die Akteur*innen entlang der Wertschöpfungskette vermehrt gezwungen, neue Geschäftsmodelle für den PV-Recyclingkreislauf zu entwickeln. Beispielsweise sind die Hersteller*innen mit der verbindlichen erweiterten Herstellerverantwortung durch die WEEE-Richtlinie der EU zu zusätzlichen Akteur*innen geworden, die für die Förderung der Praktiken zur Entsorgung von PV am Ende der Lebensdauer unerlässlich sind.

Weiters bietet die Schaffung eines neuen PV-Abfallmanagementsystems die Möglichkeit zur Schaffung von Arbeitsplätzen. Dazu müssen geeignete Ausbildungsprogramme geschaffen werden, welche die neuen Personalanforderungen der PV-Recyclingindustrie bedienen. Zudem ist die Schaffung eines funktionierenden PV-End-of-Life Managements eng mit zielgerichteten F&E-Aktivitäten verbunden, sowohl in Hinblick auf technische Lösungen als auch in Hinblick auf wirtschaftlich-organisatorische Rahmenbedingungen. Neben der Erforschung von Recycling- und Behandlungsprozessen stellt sich verstärkt die Frage nach den Einsatzgebieten der zurückgewonnenen Stoffe. Zukünftig werden auch die Hersteller*innen gefragt sein, PV-Module nicht nur hinsichtlich ihrer Effizienz und des Materialeinsatzes zu optimieren, sondern auch in Hinblick auf deren Rezyklierbarkeit zu entwickeln.

Anreize und Empfehlungen

Wie die Potenzialabschätzung zeigt, ist erst in mehreren Jahren mit relevanten Mengen an PV-Abfall zu rechnen. Diese Aussage entspricht auch den Einschätzungen der eingebundenen Expert*innen. Dennoch gibt es vielerlei Maßnahmen die bereits in naher Zukunft umgesetzt werden können und müssen, um ein optimales PV-Recycling in Österreich zu etablieren. Vor diesem Hintergrund wurden schließlich folgende Empfehlungen für die Umsetzung von Urban Mining-Strategien abgeleitet:

- Trade-Off Design-for-Recycling und Lebensdauer

Design-for-Recycling Maßnahmen dürfen die Lebensdauer der Module nicht verkürzen, um negative Auswirkungen auf die Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit zu vermeiden. Maßnahmen, die hinsichtlich des Recyclings der Module positiv zu bewerten sind, bspw. Verschraubungen anstatt Verklebungen, können zu einer Verkürzung der Lebensdauer führen.

- **Regulative Vorgaben**

Die Recyclingquote für Elektro-Altgeräte wird gemäß Expertenaussage durch das Recycling des Aluminiumrahmens sowie des Glases erreicht, sodass die Motivation bzw. Anreize für weitere Design-for-Recycling-Ansätze nicht gegeben sind. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, regulative Vorgaben zu entwerfen, die strengere Recyclingquoten, z.B. für einzelne Stoffe bzw. Komponenten für PV-Module vorsehen. Weiters können spezifische Design-for-Recycling Vorgaben, z.B. Zerlegbarkeit, Vermeidung von Schadstoffen, Verwendung genormter Materialien für einzelne Komponenten für alle PV-Module, usw., gesetzt werden.

- **Langfristige Entwicklung**

Aufgrund bisher geringer Mengen an Altmodulen erfolgt das Recycling derzeit manuell, eine Automatisierung des Prozesses existiert noch nicht. Mit steigenden Mengen wird es zu einer verstärkten Automatisierung kommen. Entsorgungs- und Recyclingunternehmen sollten daher auf längerfristige Planung setzen. „Frontrunner“ könnten sich Wettbewerbsvorteile am PV-Recycling-Markt schaffen. Aufgrund der schwierigen Prognostizierbarkeit der Entwicklung, besteht allerdings die Gefahr von langen Amortisationszeiten und auch Sunk Costs, wenn die erwarteten Mengen ausbleiben.

- **Kataster der verbauten PV-Anlagen**

Eine bundesweite Registrierung der verbauten PV-Anlagen nach Ort und Typ der verbauten Module ist empfehlenswert. Auf diese Weise ist transparent ersichtlich, mit welchen Recyclingmengen zu rechnen ist. Zusätzlich sollten in diesem Register auch die Hersteller*innen und die Herkunft des verbauten PV-Moduls verzeichnet werden, um Rückschlüsse auf Lebensdauer und Bauart treffen zu können. Zusätzlich kann über ein Register abgeschätzt werden, welches Potential an Sekundärrohstoffen aus PV-Modulen besteht.

- **Zerlegepläne und Materialzusammensetzung**

Frei zugängliche Zerlegepläne für PV-Module sind ein Baustein zur effizienteren Gestaltung des Recyclingprozesses. Die genaue Angabe der Materialzusammensetzung der PV-Module gibt Aufschluss über den Wert der im Modul enthaltenen Sekundärrohstoffe und unterstützt die Wahl des passenden Recyclingverfahrens. Zusätzlich hilft die Kenntnis der Materialzusammensetzung im Umgang mit Schadstoffen.

3.2.1.5 Fallstudienspezifische Fragestellungen

Im Zuge dieser Fallstudie wird die effiziente Nutzung bzw. Rückgewinnung von Materialien in PV-Anlagen untersucht. Das Ziel der Fallstudie ist es, Energie- und Ressourceneinsparungen durch die gezielte Nutzung und Verwertung von PV-Modulen am Ende ihrer Lebensdauer zu untersuchen und darzustellen, welchen Beitrag Urban Mining bzw. die effiziente Nutzung bzw. Rückgewinnung von Materialien aus PV-Anlagen zur Gestaltung ressourcen- und energieeffizienter Kreisläufe leisten kann. Dazu werden unterschiedliche Arten von PV-Modulen (kristalline Module, Dünnschichtmodule) in Hinblick auf potentielle Energie- und Ressourceneinsparungen durch ein Recycling der eingebauten Materialien bzw. Wiederverwendung von Komponenten sowie mögliche Verbesserungen in Bezug auf

die Zerlegbarkeit und Verwertbarkeit der PV-Anlagen bewertet. Insbesondere soll analysiert werden, welcher Mehraufwand (Energie, Kosten) bei der Herstellung recyclingfähiger Produkte und Komponenten entsteht (Design-for-Recycling) und inwieweit sich die Kosten senken lassen.

1A Wo ergeben sich größere Effizienzpotenziale in Bezug auf Material- und Energieeinsatz bei der Verwertung von PV-Anlagen?

Trotz bis dato geringer Erfahrungswerte zur Verwertung von PV-Modulen können erste Ansätze in Bezug auf den Material- und Energieeinsatz genannt werden. Derzeit werden die wenigen Module, die der Verwertung zugeführt werden, bei klassischen Abfallbehandlungsunternehmen abgegeben und zumeist manuell bearbeitet. Dabei werden der Rahmen und das Glas vom Si-Modul getrennt. Der Rest, demnach die Verkapselung (Laminat, Si-Zelle, usw.) werden der Entsorgung bzw. teilweise der Weiterverarbeitung (Flachglasrecycling) zugeführt. Da Glas und Rahmen einen hohen Gewichtsanteil ausmachen, wird auf diese Weise die geforderte Recyclingquote von 80 % erreicht. Eine Übererfüllung der Recyclingquote durch ein zusätzliches Recycling der Verkapselung wird erst dann stattfinden, wenn dies wirtschaftlich ist, sodass hier noch Effizienzpotenziale bestehen. Ein weiteres Effizienzpotential ist die Tatsache, dass die Verkapselung mit nur hohem Aufwand (thermisch-chemische Prozessschritte) zu lösen ist. Dazu wurden bereits in einzelnen Forschungsprojekten neue Design-for-Recycling Ansätze, wie der Einsatz von Thermokunststoffen anstatt der EVA-Einkapselung oder der Einsatz von Release-Layer (abziehbare Schutzschicht) erprobt. In einem weiteren Projekt wurde untersucht, wie ein Modul ohne Einkapselung auskommen könnte, indem auf die Laminierung verzichtet wird (NICE-Modul-Konzept). Hinsichtlich der Effizienz bei der Verwertung ist jedoch stets auf einen Trade-Off zwischen Rezyklierbarkeit und Modul-Effizienz zu achten. Laut Expert*innenmeinung wird davon ausgegangen, dass ohne die gängige Verkapselung das Modul seine Dichtheit verliert und dadurch Gewährleistungs- und Garantieansprüche für den Modulhersteller*innen schlagend werden.¹

Es ist davon auszugehen, dass durch erhöhte Rücklaufquoten der Module die Effizienz hinsichtlich der Verwertung zunehmen wird. Durch vermehrtes Know-how kann eine effiziente Verwertungslogistik mittels (teil)automatisierter Verfahrensschritte sowie neuer Geschäftsmodelle entstehen. Ein erster Schritt wurde bereits mit der Etablierung des PV Cycle-Netzwerks geschaffen. Zudem bedarf es, unabhängig der Rücklaufquoten, rechtlicher und organisatorischer Anpassungen, um zur klären, wer die Module entgegenzunehmen und die Kosten zu tragen hat. Aktuell erfolgt noch eine manuelle Behandlung der Module und in diesem Zusammenhang ist vor allem von einem erhöhten Personaleinsatz auszugehen. Es existieren zwar bereits Pilotanlagen zur automatisierten Aufarbeitung von Modulen, die Datenlage dazu reicht jedoch nicht aus, klare Aussagen zum Verhältnis Material-/Energieeinsatz treffen zu können.

1B Wie kann das Interesse der PV-Industrie erhöht werden, die Rückgewinnung von Rohstoffen zu erhöhen? Welche Ansätze stehen dafür zur Verfügung?

In Gesprächen mit Vertreter*innen der Abfallwirtschaft, als auch der PV-Branche wird großes Interesse hinsichtlich PV-Recycling bekundet, wenngleich aktuell keine detaillierten Konzepte vorliegen. In diesem Zusammenhang wird meist auf den Gesetzgeber verwiesen, der klar und deutlich die Verwertung zu regeln hat bzw. wird auf erhöhte Rücklaufquoten gewartet, um Geschäftsmodelle zu entwickeln. Dass grundsätzliche Interesse an der Thematik besteht, beweist der Zusammenschluss der

¹ Laut den im Rahmen der Fallstudie durchgeführten Experteninterviews. Die Experteninterviews sind im Anhang des vorliegenden Berichts angeführt.

PV-Industrie zum Netzwerk PV Cycle, jedoch bedarf es noch weiterer Maßnahmen, um das Interesse der PV-Branche sowie der Abfallwirtschaft zu erhöhen. Die erneuerbare Energietechnologie Photovoltaik gilt als „grüne“ und „saubere“ Technologie, wobei sich dies meist nur auf die Primärenergiequelle bezieht. Die Herstellung sowie die Verwertung der dafür benötigten Module wird dabei - sowohl von Hersteller- als auch von Verbraucherseite - wenig betrachtet. Aus diesem Grund bedarf es weiterer Sensibilisierungsmaßnahmen, was den Umgang mit beschädigten Modulen betrifft.

Hersteller*innen könnten vom Sekundärrohstoffeinsatz in der Produktion einerseits wirtschaftlich profitieren und andererseits dem Produkt ein positiveres Image verleihen. Einen weiteren Anreiz, das Interesse der Rückgewinnung von Rohstoffen sowie Rezyklierbarkeit zu wecken, bietet die Ökodesign-Richtlinie (2009/125/EG). Gemäß dieser Richtlinie werden Ökodesign-Parameter über den gesamten Produktlebenszyklus (inkl. Verwertung bzw. Entsorgung) definiert, die zu erwartenden Abfallmengen durch das Produkt abgeschätzt und Wiederverwendungs- und Recyclingoptionen des Produkts angegeben. Letztlich kann die Rückgewinnung von Rohstoffen auch dadurch erhöht werden, indem durch gesetzliche Vorgaben die Recyclingrate der Module angehoben wird bzw. materialspezifische Recyclingraten eingeführt werden.

1C Welche Strategien und Rahmenbedingungen tragen zu einer Optimierung von Kreisläufen im Bereich der PV-Anlagen bei? Welcher Mehraufwand (Energie, Kosten) entsteht bei der Herstellung recyclingfähiger PV-Anlagen-Elementen?

Der Einsatz von Sekundärrohstoffen spielt bislang in der Herstellung von PV-Modulen eine untergeordnete Rolle, sodass hinsichtlich Mehraufwand recyclingfähiger Produkte nur vorläufige Aussagen getätigt werden können. Da das Modul aus verschiedenen Materialien besteht, ist der Mehraufwand je nach Material gesondert zu betrachten, da die Anforderungen an jede Komponente unterschiedlich hoch sind und unterschiedliche Qualität aufweisen muss. Jedoch ist anzumerken, dass in einzelnen Pilotaufbereitungsanlagen bereits eine sehr hohe Recyclingrate von kristallinen Modulen erreicht werden kann, sodass daraus Sekundärrohstoffe gewonnen werden können. In der Herstellung von Glas und Metallen ist der Einsatz von Sekundärrohstoffen technisch erprobt, eine gängige Vorgehensweise und zudem wirtschaftlich. Wie von Expert*innen bestätigt, lassen sich beinahe alle Materialien entsprechend wiederaufbereiten, was in Abhängigkeit der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen auch tatsächlich gemacht wird. Die wirtschaftliche Darstellbarkeit wird v.a. durch die Kosten der Aufbereitung bzw. Behandlung des Moduls sowie der am Markt zu erzielenden Preise determiniert. Laut Expert*innenmeinungen ist zwar die Wiedergewinnung der geringen Mengenanteile an Silizium zwar technisch möglich, aufgrund des derzeit geringen Silizium-Preises jedoch aus wirtschaftlicher Sicht nicht zielführend.² Die spezifischen Aufbereitungskosten können dabei v.a. durch (teil)automatisierte Prozesse gegenüber derzeit manuellen Tätigkeiten gesenkt werden. Dies erfordert steigende Rücklaufquoten, wodurch in diesem Zusammenhang von Skaleneffekten gesprochen werden kann.

Wie bereits dargestellt, ist die Wiedergewinnung des Großteils der in einem Modul verbauten Materialien aus technischer Sicht bereits möglich. Aus rechtlicher Sicht gibt die WEEE-Richtlinie eine bestimmte Recyclingquote von PV-Modulen (80 %) vor, was einer bestimmten Strategie bzw. Rahmenbedingung hinsichtlich Optimierung von Kreisläufen entspricht. Aus rechtlicher Sicht ist hierbei noch die Ökodesign-Richtlinie (2009/125/EG) zu nennen, welche bereits bei der Gestaltung des

² Laut den im Rahmen der Fallstudie durchgeführten Experteninterviews. Die Experteninterviews sind im Anhang des vorliegenden Berichts angeführt.

jeweiligen Produkts, die zu erwartenden Abfallmengen abschätzt und Wiederverwendungs- und Recyclingoptionen des Produkts angibt. Neben den Vorgaben durch den Gesetzgeber können auch organisatorische Maßnahmen, wie es das Netzwerk PV Cycle darstellt, das Recycling von PV-Modulen vereinfachen. Aus wirtschaftlicher Sicht wäre die Entwicklung von neuen Geschäftsmodellen gefragt, dazu bedarf es einer rechtlichen Klarstellung, wer die Kosten für das Recycling übernimmt, sofern Erst-in-Verkehr-Bringer*innen bzw. Hersteller*innen nicht greifbar sind. Gemäß Expert*innen sollen die Hersteller*innen der Module, ähnlich wie bei Elektrogeräten, stärker in die Pflicht genommen werden und die Kosten für die Entsorgung bzw. Verwertung einheitlich geregelt werden.³

Allgemein kann die Aussage getroffen werden, dass das Thema Recycling von PV-Modulen deutlich an Bedeutung gewinnt, was vor allem auf den zunehmenden weltweiten Ausbau der Photovoltaik sowie energiepolitischer und rechtlicher Rahmenbedingungen zurückzuführen ist. Dennoch sind die Rücklaufquoten bis dato (Jahr 2018) zu gering, um entsprechende Erfahrungen zu sammeln, sodass die Fragestellungen zum aktuellen Zeitpunkt nicht allumfassend beantwortet werden können.

3.2.2 Fallstudie 2: Erdverlegte Strom- und Telekommunikationsinfrastrukturen

3.2.2.1 Einleitung

Der Untergrund birgt ein enormes Netzwerk an Leitungen (Strom, Telekommunikation, etc.), welches die Bereitstellung von verschiedenen Dienstleistungen ermöglicht. Wie die österreichischen E-Control Berichte zeigen, wächst dieses unterirdische Netzwerk beträchtlich. So stieg die Trassenlänge von Kabelleitungen um rund 11 % von 153.800 km im Jahr 2010 auf 171.500 km im Jahr 2016 (Boltz 2010, Eigenbauer et al. 2017).



Abbildung 27: Grafik zu erdverlegte Leitungen (Tatwort/Fredmansky 2014)

Weiters führen technologische Fortschritte, wie z.B. die Breitbandinitiative, zu einer stetigen Erneuerung des Netzes. Um dem Aspekt der Versorgungssicherheit gerecht zu werden, bedarf es zudem einer kontinuierlichen Kontrolle des unterirdischen Netzwerkes, da, so wie bei anderen Gebrauchsgütern, Instandhaltungen und Abschreibungen von Nöten sind. So beträgt die durchschnittliche Lebensdauer von Stromleitungen rund 40 Jahre, wobei der störungsarme Betrieb im Durchschnitt mit bis zu 25 Jahren angenommen wird (Randacher 2017). Die Gesamtheit dieser Prozesse ist mit einem Bedarf an Ressourcen und Energie verbunden.

³ Laut den im Rahmen der Fallstudie durchgeführten Experteninterviews. Die Experteninterviews sind im Anhang des vorliegenden Berichts angeführt.

Bei Betrachtung der bestehenden bzw. entstehenden Netzinfrastruktur von Strom und Telekommunikation wird das Potenzial an Ressourcen ersichtlich. So befinden sich in Leitungen verbaute Metalle wie Kupfer und Aluminium, die eine wertvolle Ressource an Sekundärmaterialien darstellen, die u.a. zur Deckung des generell steigenden Rohstoffbedarfs herangezogen werden können. Materialien, die für die Ummantelung bzw. Isolierung von Leitungen verwendet werden (Kunststoff und Papier), können ebenfalls stofflich oder thermisch verwertet werden und dadurch Primärrohstoffe oder Primärenergieträger substituieren. Der gezielte Rückbau von (stillgelegten) Leitungen kann daher einen Beitrag zur Schonung natürlicher Ressourcen leisten. Aktuell wird jedoch kein Rückbau von erdverlegten Leitungen nach Ablauf der Nutzungsdauer forciert, sondern - vorwiegend aus monetären Gründen - der Verbleib im Erdreich gewählt. Hierbei kommt es entweder zur vollkommenen Stilllegung oder Deaktivierung der alten Leitungen. Bei einer Deaktivierung von Leitungen bedeutet dies, dass die Leitungen noch als Überbrückungssystem im Falle von Instandhaltungsarbeiten des neuen Leitungssystems dienen, sofern die Funktionalität der alten Leitungen noch gegeben ist. Generell kommt es jedoch bei beiden Formen zu einem Verlust von Ressourcen. Um diesem Ressourcenverlust zu entgegnen, sollte daher eine fundierte Basis für Urban Mining Ansätze geschaffen werden, um Alternativen zu diesem Ressourcenverlust zu finden und ökologisch und ökonomisch effiziente Rückgewinnungsvarianten zu fördern.

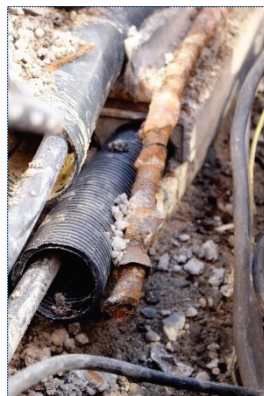


Abbildung 28: Verlegte Erdkabel (TU Wien)

Mittels exemplarischer Untersuchung von erdverlegter Netzinfrastruktur wird das Potenzial des Urban Minings von Leitungen (Strom und Telekommunikation) und damit der Rückgewinnung von relevanten Rohstoffen (wie z.B. Kupfer, Aluminium) im Untergrund bewertet. Hierfür werden vorhandene sowie empirisch ermittelte Daten herangezogen, anhand welcher unterschiedliche Rückbauvarianten untersucht und ökologisch bewertet werden.

Datengrundgrundlage für die erste Fallstudie bildet das „Urban Flows Projekt“ und der darin durchgeführte Fallstudie zum „Straßenbahnbezirk Kaunitzgasse“ (Daxbeck et al. 2018), sowie die vorangegangene Variantenstudie von der RAIL Randacher:Andreas:Ingenieur: Leistungen e.U. (RAIL) (2017) (Randacher 2017). Ziel der ökologischen Bewertung ist die Gegenüberstellung der Ressourcen- und Energieeinsparungen der einzelnen Rückbauvarianten, gemessen an ausgewählten Wirkungskategorien („Globale Erwärmung“, „Abbau abiotischer Ressourcen“ und „Kumulierter Primärenergieaufwand“). Zudem wurde in einem weiteren Schritt analysiert, welche Rahmenbedingungen (Künnettiefe, Kabelzusammensetzung, Straßenoberfläche) von Leitungstrassen maßgeblich zu einer positiven Ökobilanz (gemessen anhand der Wirkungskategorien „Globale Erwärmung“ und „Abbau abiotischer Ressourcen“) beitragen. Die Ergebnisse lassen

Rückschlüsse auf Einsparungspotenziale zu und können als Entscheidungshilfe bei Rückbauplanungen herangezogen werden.

Aufgrund der (oftmals) schlechten Datenlage zu erdverlegten Leitungen wird in einem letzten Schritt der Aspekt der fehlenden Informationslage näher behandelt. Hierbei werden ausgewählte Baustellen und deren Leitungskünetten besichtigt und die Lagedaten zu den vorgefundenen Leitungen (vor Ort) erhoben. Diese empirisch erhobenen Daten werden im Anschluss mit dem öffentlichen Leitungsverzeichnis verglichen und so auf deren Genauigkeit überprüft. Dies ermöglicht in weiterer Folge, Lücken in der Informationslage von erdverlegten Leitungen zu erkennen, die die Rückgewinnung von Leitungen erschweren bzw. verhindern.

Folgende fallstudien-spezifische Fragestellungen sollen mit den einzelnen Arbeitsschritten beantwortet werden:

- 2A Wo ergeben sich die größten Ressourcen- und Energieeinsparungen bei der Rückgewinnung von erdverlegten Kabeln?
- 2B Welche Rahmenbedingungen begünstigen die Rückgewinnung von erdverlegten Kabeln?
- 2C Mit welcher Unsicherheit ist die Informationslage zu erdverlegten Leitungen behaftet?
- 2D Welche Barrieren und Hemmnisse gilt es im Urban Mining von erdverlegten Netzwerken zu überwinden, um den Rückbau von stillgelegten Leitungen im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu optimieren?

3.2.2.2 *Material und Methoden*

In Fallstudie 2 werden drei Themenschwerpunkte unterschieden:

- A. Fallstudie „Straßenbahnbezirk“
- B. Modelltrassen
- C. Baustellenbesichtigungen

Die methodische Vorgehensweise in der Fallstudie „Straßenbahnbezirk“ und den Modelltrassen ist dieselbe und wird daher nur in Ersterer näher beschrieben.

Fallstudie „Straßenbahnbezirk“

Im Rahmen der Fallstudie werden die Ressourcen- und Umweltauswirkungen verschiedener Umbauvarianten für die Stromversorgung eines Teilbereiches der Wiener Straßenbahn anhand eines mehrstufigen Ansatzes ermittelt. Zunächst werden bestehende Massen- und Energiebilanzen zu den Umbauvarianten ausgewertet (Daxbeck et al. 2018). In einem weiteren Schritt werden die vorliegenden Prozessdaten mit Datensätzen aus einschlägigen Ökobilanz-Datenbanken (u.a. ecoinvent v3.3, Gemis v4.95) verknüpft. Abschließend werden anhand von ausgewählten Wirkungskategorien die Umweltauswirkungen und der Ressourcenverbrauch der einzelnen Varianten bewertet. Zur Beurteilung der Ressourcenschonung der betrachteten Varianten werden die Wirkungskategorien

„kumulierter Primärenergieaufwand“ und „abiotischer Ressourcenverbrauch“, sowie zur Beurteilung von Umweltauswirkungen „Globale Erwärmung“ gewählt.

Untersuchungsrahmen und funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit für den Vergleich der unterschiedlichen Varianten bildet die Stromversorgung eines definierten Teiles des Wiener Straßenbahnnetzes, wobei nur die Kabelanlagen betrachtet werden (und keine sonstigen Einbauten bzw. Unterwerke). Im vorliegenden Fall handelt es sich um eine veraltete Anlage (über 30 Jahre alte Anlagenteile sowie ineffiziente Kabellängen), die für die energetische Versorgung eines Straßenbahnbezirkes verantwortlich ist. Es wurden im Zuge von Vorstudien drei mögliche Umbauvarianten ausgearbeitet (A-C), monetär (Randacher 2017) und in Hinblick auf Massen-, Energie- und Stoffflüsse bewertet (vgl. „Urban Flows“ Endbericht (Daxbeck et al. 2018)).

In der nachfolgenden Auflistung werden diese Umbauvarianten (A bis C) näher beschrieben (siehe Abbildung 29):

- Variante A: Vollsanieung der Kabelanlage
 - Renovierung des bestehenden Unterwerkes sowie Erneuerung der Kabelanlage
 - Rückbau von stillgelegten Leitungen
 - Trassenlänge: 12.000 m
- Variante B: Teilsanieung der Kabelanlage, Umlegung von bestimmten Bahnpunkten
 - Teilweise Verlagerung von Einspeisepunkten in ein benachbartes Unterwerk
 - Teilweiser Rückbau von stillgelegten Leitungen
 - Trassenlänge: 11.600 m
- Variante C: Vollständige Umlegung der Bahnpunkte
 - Bestehendes Unterwerk wird komplett aufgelassen und durch ein neu errichtetes Unterwerk (in der Nähe) ersetzt
 - Kein Rückbau von stillgelegten Leitungen
 - Trassenlänge: 5.250 m

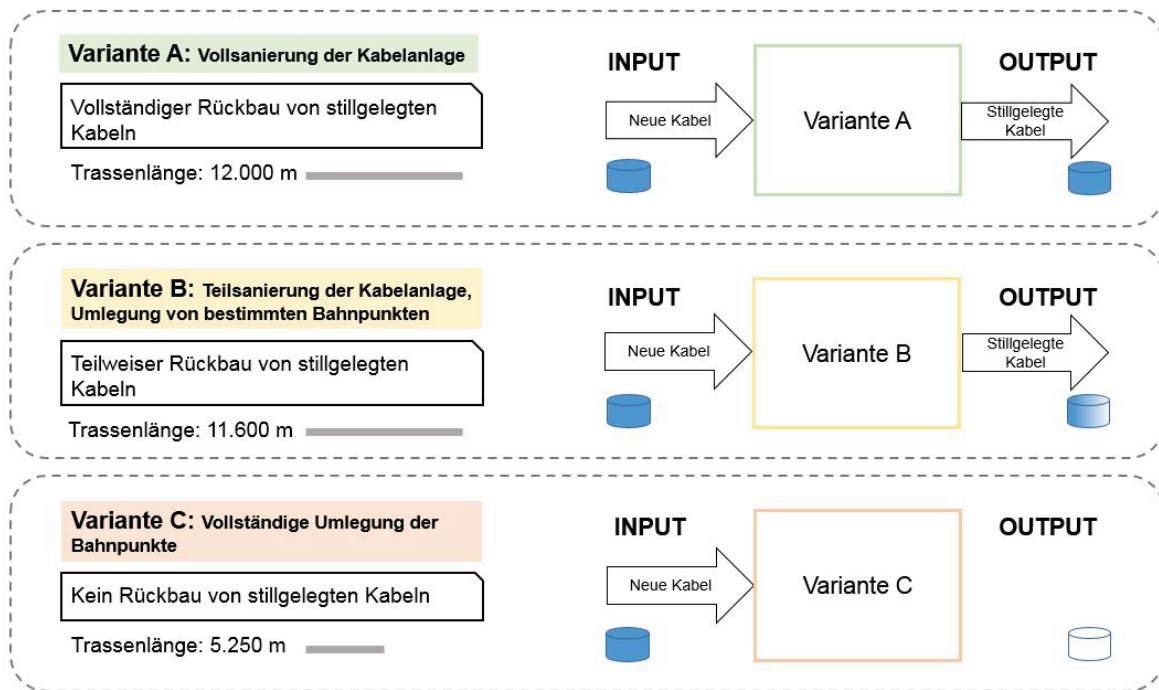


Abbildung 29: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Varianten zur Bewertung der Fallstudie "Straßenbahnbezirk" in Bezug auf die Rückgewinnung von verbauten Kabeln

Die in dieser Fallstudie durchgeführte Wirkungsabschätzung beruht auf den Material- und Energieflüssen, die in direktem Zusammenhang mit den Umbauvarianten der Kabelanlage stehen. Der Verbrauch von Materialien und Energie, sowie der Nutzen durch stoffliches und thermisches Recycling, werden anhand von Ökobilanzdaten aus einschlägigen Datenbanken (u.a. ecoinvent v3.3, Gemis v4.95) ermittelt. Zur Berücksichtigung des Nutzens durch Recycling wird ein Systemerweiterungsansatz gewählt, welcher vorsieht, dass der vermiedene Aufwand durch die Substitution der alternativen Produktion als Gutschrift in der Bewertung berücksichtigt wird. Die Substitution erfolgt basierend auf der funktionalen Äquivalenz von Sekundär- und Primärprodukten auf dem Markt, so wird z.B. durch Sekundärkupfer aus Kupferschrott die gleiche Menge an Primärkupfer aus Kupfererz auf dem Markt ersetzt. Im Rahmen der Ökobilanz wird durch die Bereitstellung eines Sekundärproduktes jeweils das äquivalente marginale Primärprodukt ersetzt (= Konsequenz-orientierte Ökobilanz).

Ausgewertete Material- und Energieflüsse

Durch Auswertung der varianten-bezogenen Sachbilanzen aus Daxbeck et al. (2018) und der Bilanzierung von allen relevanten Material- und Energieflüssen werden die spezifischen Ressourcenaufwendungen und Emissionen erfasst. Darauf basierend werden die dazugehörigen Verwertungs- und Transportprozesse festgelegt und mit den passenden Ökobilanz-Datensätzen verknüpft. In den folgenden Absätzen werden diese Schritte näher beschrieben.

Die bestehende Kabelanlage des Unterwerkes umfasst eine Trassenlänge von 12.000 m. Die Maße der Künette sind wie folgt: Tiefe: 0,8 m (von der Straßenbelagsunterkante); Breite: 0,4 m. Die Künette setzt sich aus zwei Bereichen zusammen: der Leitungszone (Höhe von mind. 10 cm von der Künettenunterkante) und der Verfüllzone (Künettentiefe minus der Leitungszonenhöhe). Die Massenzusammensetzung der bestehenden Kabelanlage bzw. Trasse setzt sich wie folgt zusammen (Daxbeck et al. 2018):

- Kunststoffe (PVC, PE, sonstige Kunststoffe): 35 Tonnen
- Metalle (Stahl, Kupfer, Aluminium, Blei): 250 Tonnen
- Verfüllmaterialien (Kies, Sand): 7.770 Tonnen
- Straßenaufbau (Asphalt): 1.100 Tonnen
- Sonstige Materialien (haftmassegetränktes Papier): 32 Tonnen

In Variante A wird das vollständige Unterwerk samt Kabelanlage renoviert. Dabei kommt es zur integrierten Rückgewinnung von stillgelegten Leitungen, bei gleichzeitigem Einbau von neuen Leitungen. Die bearbeitete Trassenlänge beträgt somit, sowohl für den Rückbau von stillgelegten Leitungen, als auch für den Einbau von neuen Leitungen, 12.000 m. Bei den neuen Leitungen sind im Vergleich zu den stillgelegten Leitungen neue Materialzusammensetzungen vorzufinden. So wird auf den Einbau von bleihaltigen Kabeln, sowie haftmassegetränkte Papierisolierungen verzichtet. Die Materialien der rückgebauten Leitungen werden einem stofflichen bzw. thermischen Recycling unterzogen. Die Gutschriften aus dem Recycling werden über die Substitution der jeweiligen Materialien in der Primärproduktion berücksichtigt.

In Variante B kommt es zu einer Teilsanierung des Unterwerkes, wobei nicht alle stillgelegten Leitungen ausgebaut werden. Durch die Umlegung von bestimmten Bahnpunkten werden neue Anlagenteile eingebaut. Zusätzlich müssen neue Trassen verlegt werden. Die betroffene Trassenlänge beträgt 11.600 m. Wie in Variante A, kommt es zum Einbau von neuen Kabeltypen, die frei von Blei sind und keine haftmassegetränkte Papierummantelung vorweisen. Ebenso werden die rückgebauten Materialien einem stofflichen bzw. thermischen Recycling unterzogen. Die Gutschriften aus dem Recycling werden über die Substitution der jeweiligen Materialien in der Primärproduktion berücksichtigt.

In Variante C kommt es zur vollständigen Auflösung des bestehenden Unterwerkes. Als Ersatz wird ein neues Unterwerk in unmittelbarer Nähe erbaut. Die stillgelegten Leitungen bleiben somit im Untergrund. In Summe werden 5.250 m Trassenlänge bearbeitet. Da es zu keinem Rückbau von stillgelegten Leitungen kommt, kommt es sinngemäß zu keiner Substitution von Primärrohstoffen.

Die festgelegten Prozesse, die sich im Zuge der Umbauvarianten ergeben, sind in Tabelle 10 näher beschrieben. Die Auswahl der Prozesse ist zudem durch die Studie von Krook et al. (2015) beeinflusst, da diese im Bereich von Urban Mining von Leitungen eine Vorreiterrolle einnimmt. Sinngemäß fallen die Prozesse „Thermische Verwertung“ und „Metallrecycling“ bei Variante C in nur sehr geringer Größe an, da es hier zu keinem Rückbau von stillgelegten Leitungen kommt. Die bei Variante A und B rückgewonnenen Ressourcen (Kunststoffe, Papier und Metalle) werden unterschiedlichen Verwertungsprozessen zugeführt. So gelangen die Kunststoffe und Papierreste der Kabelisolierung/-ummantelung als Sekundärbrennstoffe in eine thermische Verwertungsanlage (angenommen Müllverbrennungsanlage Spittelau). Die Angaben zu Heizwert und klimarelevantem CO₂-Ausstoß der Sekundärbrennstoffe, sowie zu den thermischen Wirkungsgraden der Anlagen, finden sich im Anhang (Tabelle 26 und Tabelle 27). Die rückgewonnenen Metalle werden einer stofflichen Verwertung (Sekundärmetallproduktion) zugeführt und substituieren so Primärmetalle.

Tabelle 10: Erklärungen zu den selektierten Prozessen der ökologischen Bewertung.

MATERIALIEN	PROZESSE	ERKLÄRUNGEN
PVC, PE, sonstige Kunststoffe, Papier	Thermische Verwertung	betrifft die thermische Verwertung von Isolierungen von stillgelegten, rückgebauten Leitungen
	Neue Kunststoffe	betrifft die Produktion von neuen Kunststoffen für die Isolierung von neuen Leitungen
	Transport	betrifft den Transport zur Müllverbrennungsanlage
Stahl, Kupfer, Aluminium, Blei	Metallrecycling	betrifft die gewonnenen Metalle aus den stillgelegten, rückgebauten Leitungen hierbei wird die Substitution der Produktion von Primärmetallen berücksichtigt
	Neue Metalle	betrifft die Produktion von neuen Metallen für neu verlegte Leitungen
	Transport	betrifft den LKW-Transport zur Metallschmelze/ Recycling bzw. zur Primärproduktion
Kies, Sand	Deponie	betrifft die Deponierung von alten Verfüllmaterialien
	Neue Verfüllmaterialien	betrifft die Produktion von neuen Verfüllmaterialien
	Transport	betrifft den LKW-Transport zur Deponie bzw. zur Primärproduktion
Asphalt	Deponie	betrifft die Deponierung von altem Asphalt
	Neuer Asphalt	betrifft die Produktion von neuem Asphalt als Oberflächenmaterial
	Transport	betrifft den LKW-Transport zur Deponie bzw. zur Asphaltproduktion
	Aufgrabung	betrifft die aufgrabungsbedingten Baggertätigkeiten

Die für den Prozess „Transport“ angenommenen Transportdistanzen sind im Anhang (siehe Tabelle 23) dargestellt. Die Abfälle (Sand, Kies und Asphalt) aus den Aufgrabungstätigkeiten werden zur Inertdeponie „Langes Feld“ (im Nordosten von Wien) geführt und dort sachgerecht abgelagert (beruht auf Annahmen). Der spezifische Energieaufwand der Baggertätigkeiten (Prozess „Aufgrabung“) richtet sich nach dem Volumen des bewegten Materials (Daxbeck et al. 2018). Die Daten zu den Aufwänden der einzelnen Prozesse werden anhand von Ökobilanz-Datenbanken ermittelt. Hierbei wurde vor allem die ecoinvent Datenbank v3.3 (Ecoinvent Association 2017), sowie die Gemis Datenbank v4.95 (Gemis 2018) herangezogen. Die genaue Aufstellung der herangezogenen Datenbankprozesse (mit den dazugehörigen Quellen) findet sich im Anhang (siehe Tabelle 24). Die Verwertung von Materialien stellt eine Gutschrift in der Ökobilanzbetrachtung dar. Für jedes Sekundärprodukt wird ein entsprechendes Primärprodukt bestimmt, dessen Erzeugung durch die Bereitstellung des Sekundärproduktes vermieden wird. Anhand eines Substitutionsfaktors wird die funktionelle Äquivalenz zwischen Sekundär- und Primärprodukt abgebildet. Im Rahmen der Szenarien wird für alle Sekundärprodukte von vollständiger Äquivalenz (Substitutionsfaktor = 1) ausgegangen, so ersetzt beispielweise Strom und Wärme aus einer Müllverbrennungsanlage in gleichem Ausmaß (energiebezogen) Strom und Wärme der marginalen Strom- und Wärmeproduktionstechnologien. In Österreich sind dies Strom erzeugt aus Steinkohle und Wärme aus Erdgas (vgl. (Van Eygen et al. unter Begutachtung)). Eine Aufstellung der verwendeten Sekundär- und Primärproduktionsprozesse im Zuge der Ökobilanz findet sich ebenfalls im Anhang (siehe Tabelle 24).

Wirkungsabschätzung

Im Rahmen der Wirkungsabschätzung werden die Auswirkungen auf Ressourcen und Umwelt der einzelnen Varianten bewertet. Als Wirkungskategorien werden die globale Erwärmung (Treibhauspotential über 100 Jahre), der kumulierte Primärenergieaufwand und der abiotische Ressourcenverbrauch ausgewählt. Das Treibhauspotential bezieht sich auf einen Umwelteffekt von besonderer gesellschaftlicher Relevanz (Klimawandel), und der kumulierte Primärenergieaufwand sowie der abiotische Ressourcenverbrauch beziehen sich auf die effiziente Nutzung von Ressourcen.

Globale Erwärmung wird anhand des Treibhauspotentials, welches den Strahlungsantrieb eines Stoffes über einen bestimmten Zeithorizont relativ zu CO₂ ausdrückt, bewertet. Im Rahmen dieser Studie wird das Treibhauspotential über 100 Jahre entsprechend der Charakterisierungsfaktoren des IPCC-Berichts verwendet (IPCC 2013). CO₂-Emissionen biogenen Ursprungs werden als klimaneutral bewertet und mit einem Charakterisierungsfaktor (CF) von 0 belegt. Methanemissionen biogenen Ursprungs werden beispielsweise mit einem Charakterisierungsfaktor von 28,5 berücksichtigt oder Lachgasemissionen (N₂O) mit einem Faktor von 265.

Der kumulierte Energieaufwand (KEA) stellt die Summe der Aufwendungen an Primärenergie (= Energie vor der ersten Umwandlung) dar, die für die Bereitstellung eines bestimmten Produktes oder einer Leistung notwendig sind (VDI 2012). Im Rahmen der Studie wird die Implementierung der Ecoinvent-Datenbank zur Berechnung der Charakterisierungsfaktoren verwendet (Hischier et al. 2010), wobei nur der Primäraufwand aus nicht erneuerbaren Quellen (fossil, nuklear, Primärwald) berücksichtigt wird. Die Einheit dieser Wirkungskategorie sind MJ Primärenergie. Der Verbrauch an abiotischen Ressourcen wird anhand des Ressourcenabbau potentials nach CML 2001 bewertet. Darin wird der Verbrauch an mineralischen, metallischen und fossilen Rohstoffen basierend auf den vorhandenen geogenen Reserven bewertet (Hischier et al. 2010). Der Ressourcenverbrauch wird relativ zu Antimon ausgedrückt, weshalb die Einheit der Wirkungskategorie kg Sb-Äquivalente ist.

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse in den einzelnen Wirkungskategorien zu ermöglichen, wird abschließend eine Normalisierung durchgeführt. Für jede Wirkungskategorie wird eine Referenzgröße bestimmt, durch die das jeweilige Ergebnis dividiert wird. In dieser Studie werden die jeweiligen Auswirkungen eines durchschnittlichen Erdbewohners (globaler Durchschnitt) als Bezugsgröße verwendet (Laurent et al. 2013). Für das Treibhauspotential sind das 8.100 kg CO₂-Ä/Person und Jahr, für den kumulierten Energieverbrauch sind das 75 GJ Primärenergie/Person und Jahr und für den abiotischen Ressourcenverbrauch sind das 26,7 kg Sb-Ä/Person und Jahr.

Kritische Analyse und Diskussion

Im Rahmen der Fallstudie werden Sensitivitätsanalysen für die Prozesse „Neue Metalle“ und „Metallrecycling“ durchgeführt. Diese Analysen stellen einen wichtigen Teil der Wirkungsabschätzung dar, um die gewählten Ökobilanzierungsdatensätze kritisch zu betrachten. So werden in den Sensitivitätsanalysen die herangezogenen Datenbanksätze für die gewählte Wirkungskategorie („Globale Erwärmung“) um +/- 10 % variiert. Mit den Ergebnissen wird erkenntlich, ob die Variation der Datensätze einen maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung haben. Diese Analysen werden in MS Excel durchgeführt.

Modelltrassen

In Anlehnung an die Fallstudie „Straßenbahnbezirk“ werden Modelltrassen festgelegt, die typische Trassen im Stadtgebiet Wiens darstellen. Für diese Modelltrassen wird ein reiner Rückbau von stillgelegten Leitungen angenommen, somit - im Gegenteil zu Fallstudie „Straßenbahnbezirk“ - ohne Einbau von neuen Leitungen. Nach Aufstellung von realitätsgetreuen Modelltrassen werden diese - wie in Fallstudie „Straßenbahnbezirk“ - auf deren Ressourcen- und Umweltauswirkungen bewertet. Dafür werden dieselben Prozesse und Ökobilanzdatensätze wie in Fallstudie „Straßenbahnbezirk“ herangezogen. Für diesen Modelltrassenvergleich werden die Wirkungskategorien „Globale Erwärmung“ und „abiotischer Ressourcenabbau“ herangezogen. Durch diese Betrachtung ist es möglich, Faktoren zu erkennen, die einen wesentlichen Einfluss auf die Ressourcen- und Umweltauswirkungen der Rückgewinnung von Kabeln aus den Modelltrassen haben.

Untersuchungsrahmen und funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit für den Modelltrassenvergleich stellt eine Trasse im Stadtgebiet von Wien dar, bei welcher ein Rückbau von stillgelegten Leitungen durchgeführt wird. Die Modelltrasse umfasst eine fixe Länge von 100 m, sowie eine fixe Künettenbreite von 0,4 m. Die Aufteilung der Zonen in der Künette ist wie in Fallstudie „Straßenbahnbezirk“ festgelegt. Die erstellten Modelltrassen werden in Bezug auf folgende Faktoren variiert:

- Kabeltype (A, B, C),
- Kabelanzahl (1 oder 4 Kabel),
- Straßenoberfläche (Asphalt oder Grünfläche)
- und Künettentiefe (0,1 – 5,0 m Tiefe).

Die Bewertung der einzelnen Modelltrassen beruht auf den anfallenden Material- und Energieflüssen, die in einem direkten Zusammenhang mit dem Rückbau der Leitungen stehen. Die gewählten Ansätze zur Durchführung der Ökobilanzierung sind der Fallstudie „Straßenbahnbezirk“ zu entnehmen.

Herangezogene Material- und Energieflüsse

Die Material- und Energieflüsse werden – wie in Fallstudie „Straßenbahnbezirk“ - in adaptierter Form für die Berechnungen der Modelltrassen herangezogen. Aufgrund der variierenden Rahmenbedingungen (Kabeltype, Kabelanzahl, Straßenoberfläche und Künettentiefe) kommt es zu unterschiedlichen Masse- und Energiebilanzen der einzelnen Modelltrassen. So ändert sich u.a. die Masse der Verfüllmaterialien in Abhängigkeit von der Künettentiefe (0,1 bis 5,0 m). Einzig die Trassenlänge (100 m) und die Künettenbreite (0,4 m) sind als Fixgrößen festgelegt. In Abbildung 30 ist eine schematische Darstellung einer möglichen Modelltrasse mit 0,8 m Tiefe und einem Kabel (schwarz markiert) für Grünfläche und Asphalt als Straßenoberfläche dargestellt.

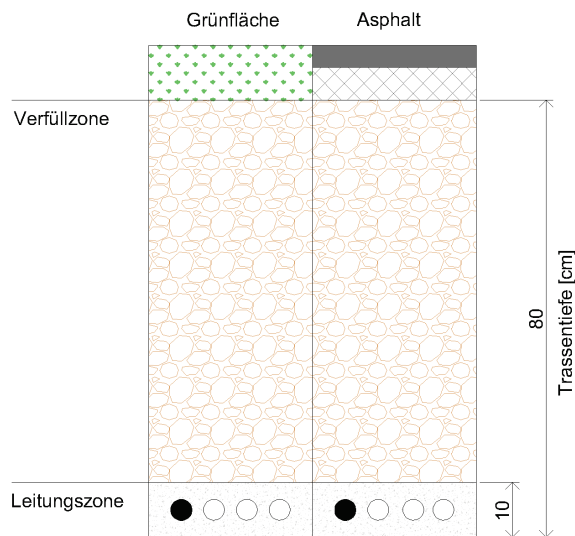


Abbildung 30: Schematische Darstellung der Modelltrasse

Die angenommenen Kabeltypen sind Erdkabel, die (derzeit) für Starkstromleitungen herangezogen werden (0,6/1,0 kV), die sich wie folgt zusammensetzen:

- Kabeltype A: Handelsbezeichnung "NAYY-J"; Aluminiumanteil: 50 %; 20,3 kg Al/ 100 m
- Kabeltype B: Handelsbezeichnung "NYCY"; Kupferanteil: 27 %; 8,1 kg Cu/ 100 m
- Kabeltype C: Handelsbezeichnung "NYY-J"; Kupferanteil: 75 %; 48,0 kg Cu/ 100 m

Bei Modelltrassen mit Asphalt als Straßenoberfläche werden auch die Aufwendungen für Deponierung und Transport zur Deponie berücksichtigt. Der spezifische Energieaufwand der Baggertätigkeiten (Prozess „Aufgrabung“) richtet sich nach dem Volumen des bewegten Materials. Durch die Betrachtung des reinen Leitungsrückbaus fallen die Prozesse betreffend Primärmetalle/-kunststoffe (= neu eingebaute Kabel) weg. Die Daten zu den Aufwänden der einzelnen Prozesse werden anhand von Ökobilanz-Datenbanken ermittelt. Die Beschreibung der Prozesse der Ökobilanzierung findet sich im Anhang (siehe Tabelle 24). Die Substitution von Primärressourcen durch die rückgewonnenen Materialien wird wie in Fallstudie „Straßenbahnbezirk“ berücksichtigt.

Wirkungsabschätzung

Siehe „Fallstudie Straßenbahnbezirk“. Die Ergebnisse der einzelnen Wirkungskategorien werden nicht normalisiert (mittels Personenäquivalente).

Baustellenbesichtigungen

Durch Begehung von selektierten, aktiven Baustellen innerhalb von Wien wird der Ist-Zustand von erdverlegten Leitungen eruiert. Durch die Aufzeichnung der vorgefundenen Leitungen (samt Trassen- bzw. Künettenbemaßung) wird ein Vergleich zu den öffentlichen Leitungsplänen (= Plan-Zustand; digitaler Zentraler Leitungskataster (dZLK) der MA28) möglich. Dieser Ist-/Plan-Vergleich zwischen den vorgefundenen und den planmäßigen Leitungen ermöglicht es festzustellen, wie genau die öffentlich zugängliche Informationslage tatsächlich ist und was dies in Hinblick auf Urban Mining Potenziale von stillgelegten/ inaktiven Leitungen bedeutet.

Untersuchungsrahmen

Im Vorfeld der Baustellenbesichtigungen, werden fünf Baustellen nach den folgenden Merkmalen selektiert:

- Auftreten von mehreren Leitungen (mind. 3 Leitungen),
- Auftreten von Telekommunikations- und/oder Stromleitungen,
- Aufgrabungszeitraum im ersten Halbjahr 2018
- und Aufgrabungsbereich liegt (vorwiegend) im Gehsteig

Durch Gespräche mit zuständigen bzw. betroffenen Magistraten (MA28, MA31) sowie Wiener Linien und Wiener Netze werden passende Baustellen festgelegt (siehe Tabelle 11) und Besichtigungstermine vereinbart. Aus datenschutzrechtlichen Gründen werden keine näheren Informationen (Adresse, etc.) zu den selektierten Baustellen veröffentlicht.

Tabelle 11: Beschreibung der selektierten Baustellen

BAUSTELLENR.	BESCHREIBUNG	VERKEHRSLAGE
1	Baustelle Nr. 1 ist Teil eines großen Bauvorhabens, welches der Erweiterung des öffentlichen Verkehrsnetzes dient. Die Arbeiten der besichtigten Baustelle umfassen die Verlegung von neuen Leitungen (Kanal, Wasser), sowie die Baugrundsicherung durch Bohrpfähle. Die Baustelle befindet sich im Gehsteig- und Fahrbahnbereich.	innerstädtischer Verkehrsknoten
2	Baustelle Nr. 2 ist Teil eines großen, innerstädtischen Bauvorhabens, welches der Erweiterung des öffentlichen Verkehrsnetzes dient. Die Arbeiten der besichtigten Baustelle umfassen die Verlegung von neuen Leitungen (u.a. Gas und Wasser), und damit verbunden das Entfernen von hinderlichen, inaktiven Einbauten (Kabel, Schienen). Die Baustelle umfasst dabei den Gehsteig und mehrere Fahrbahnen.	Innerstädtischer Verkehrsknoten
3	Baustelle Nr. 3 umfasst zwei unterschiedliche Baustellenbereiche, die sich in unmittelbarer Nähe zueinander befinden. Im 1. Bereich kommt es zur Erneuerung der Zubringerleitung zu einem Hydranten im Gehsteig, und im 2. Bereich kommt es zum Austausch von Wasserleitungen im Gehsteigbereich.	Nebenstraße in der Innenstadt; mäßiges Verkaufsaufkommen
4	Baustelle Nr. 4 bezweckt den Anschluss eines Grundstückes (Mehrparteienhaus mit Grünfläche) an die Hauptwasserleitung der Straße. Die Aufgrabungen finden vor allem im Parkstreifen statt.	Peripheres Stadtgebiet; geringes Verkaufsaufkommen
5	Baustelle Nr. 5 betrifft die Verlegung eines Zubringers (Wasser) zu einem Mehrparteienhaus. Die Aufgrabungen befinden sich im Gehsteigbereich.	Innerstädtische Einkaufsstraße; Begegnungszone

Nach Begehung der selektierten Baustellen werden die aufgenommenen Aufgrabungsskizzen (beinhalten: örtliche Lage der Aufgrabung, Maße der Aufgrabung, Leitungslage, Leitungsart/-anzahl) zur Gestaltung von Grundriss- und Schnittplänen herangezogen. In diese Pläne werden außerdem die Leitungsinformationen des digitalen Zentralen Leitungskatasters (dZLK) eingebettet. Der dZLK gibt generell Auskunft über Status (in-/aktiv), Art, Anzahl und geometrische Lage (meist ohne Tiefenabgabe) der Leitungen. Bereits ausgebaute (= totgelegt) Leitungen werden aus dem dZLK

gelöscht. Je nach der Detailliertheit der übermittelten Daten der Netzbetreiber*innen, sind die Informationen zu den einzelnen Leitungen sehr unterschiedlich. Durch diese kombinierte Darstellung (von projektbezogenen RESUM und MA28 Daten) werden Vergleiche des Ist-/Plan-Zustands der einzelnen Aufgrabungen bzw. Baustellen möglich und es werden potenzielle Differenzen (z.B. betreffend Lage und Anzahl der Leitungen), sowie Urban Mining Potenziale aufgezeigt. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Identifikation von stillgelegten/ inaktiven Kabeln, da diese oftmals nicht planmäßig erfasst sind und erst im Zuge von Baustellenaufgrabungen entdeckt werden.

3.2.2.3 Ergebnisse

Fallstudie „Straßenbahnbezirk“

Die unterschiedlichen Umbauvarianten wurden hinsichtlich ihres Beitrages zur globalen Erwärmung (Abbildung 31), ihres Beitrages zum Abbau abiotischer Ressourcen (Abbildung 32) und ihres Verbrauches an Primärenergie aus nicht erneuerbaren Quellen (Abbildung 33) bewertet. Die Ergebnisse werden in den folgenden Absätzen für jede Wirkungskategorie einzeln diskutiert.

In Abbildung 31 ist der Beitrag der einzelnen Varianten (A - C) zur globalen Erwärmung in 1.000 kg CO₂-Äquivalent (Ä) ausgedrückt und nach den unterschiedlichen Prozessen gegliedert. Es zeigt sich, dass Variante B, und damit die Teilsanierung des Unterwerkes, die einzigen Netto-Einsparungen erzielt, mit einem Betrag von -35.676 kg CO₂-Ä. Ausschlaggebend für dieses Ergebnis ist der Prozess „Metallrecycling“, welcher die Belastungen in Zusammenhang mit dem Verbrauch an neuen Materialien deutlich überkompensiert. Dies ist unter anderem auf die Zusammensetzung der Kabel zurückzuführen. So führen die hohen Anteile an Sekundäraluminium und -blei zu maßgeblichen Emissionseinsparungen. Das relativ hohe Einsparungspotenzial der Sekundärmetalle ist jedoch auch durch die, im Vergleich zum neuen Metalleinsatz, doppelt so hohe Menge erklärbar. Neben dem Prozess „Metallrecycling“ führt auch die thermische Verwertung zu relevanten Einsparungen, da Strom und Wärme im herkömmlichen Produktionssystem substituiert werden. Diese Einsparungen sind erwartungsgemäß dem hohen Substitutionspotenzial von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe zuzuschreiben. Dies kann anhand von Aluminium sehr deutlich veranschaulicht werden, da hierbei die Umweltauswirkungen (bezogen auf die Ökobilanzdatensätze) von der Primärproduktion um das 17-fache höher sind als in der Sekundärproduktion. Die größten Belastungen sind folglich dem Prozess „Neue Metalle“ zuzuschreiben.

Im Gegenteil dazu erzielte Variante A eine Netto-Belastung von 51.043 kg CO₂-Ä. Die vollständige Sanierung des Unterwerkes ist somit ressourcen- und umweltschädlicher, als die Teilsanierung des Unterwerkes. Hierbei gleichen – im Gegenteil zu Variante B – die erzielten Einsparungen durch die Verwertung von stillgelegten Leitungen die Belastungen nicht aus. Der ökologische Break Even Point⁴ in dieser Wirkungskategorie hängt somit von dem Verhältnis von ausgebauten zu eingebauten Kabeln und den hierbei eingesetzten Metallen ab. Bei Variante A werden im Vergleich zu Variante B weniger Sekundärmetalle durch den Rückbau von alten Leitungen gewonnen, als neu verlegt werden. Weiters ist bei Variante A ein deutlich höherer Gebrauch von Primäraluminium verzeichnet, welcher zu erhöhten Emissionswerten beiträgt. Variante C (= Vollständige Auflösung des Unterwerkes) schließt bei weitem am schlechtesten ab – mit einer Netto-Belastung von 634.634 kg CO₂-Ä. Daraus lässt sich schließen, dass der reine Neubau von Trassen ohne Rückbau von stillgelegten Leitungen zu negativen

⁴ Im Rahmen dieser Fallstudie wird mit Erreichen des *ökologischen Break Even Points* die erstmalige Erzielung von Netto-Einsparungen bei einer bestimmten Künettentiefe interpretiert.

Umweltauswirkungen führt. Das Netto-Ergebnis von Variante C ist somit von den hohen Belastungen des Prozesses „Neue Metalle“ bestimmt. Generell ist festzuhalten, dass die Einsparungen der Varianten A und B maßgeblich aus dem Prozess „Metallrecycling“ resultieren. Auf der Belastungsseite ist für alle drei Varianten der Prozess „Neue Metalle“ ausschlaggebend.

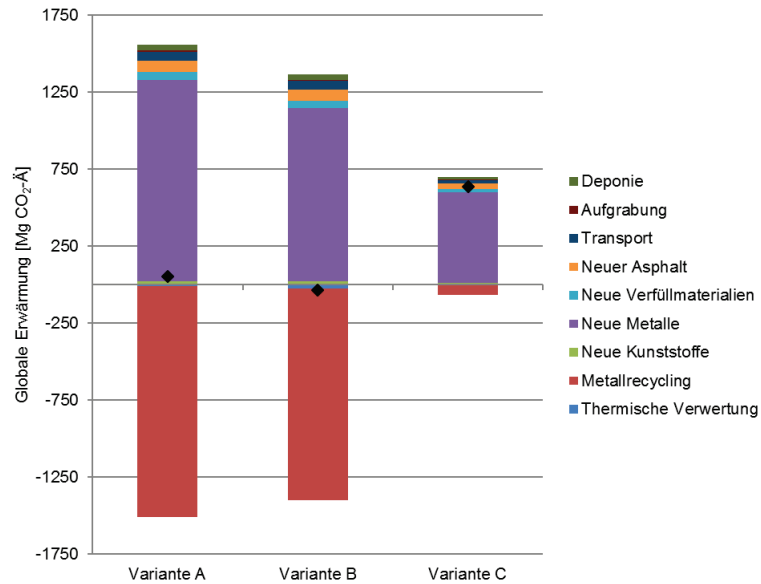


Abbildung 31: Beitrag der Varianten zur globalen Erwärmung (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)

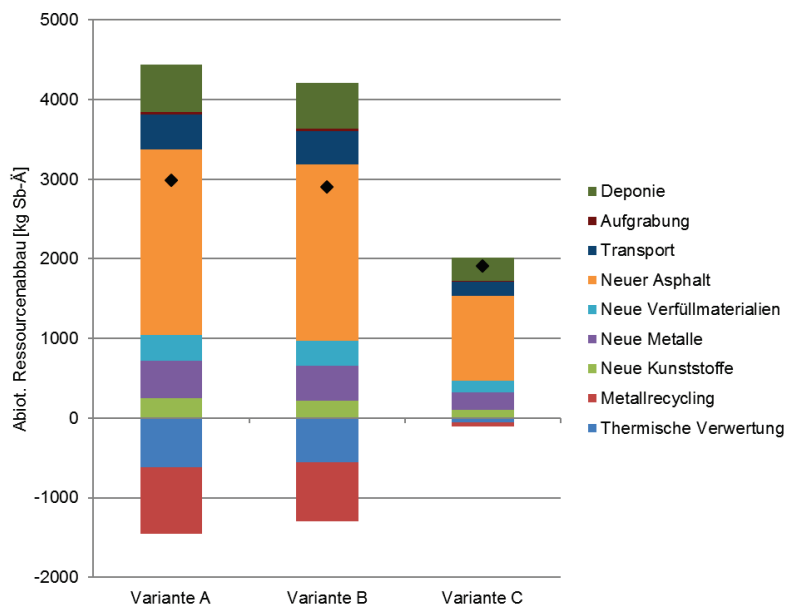


Abbildung 32: Beitrag der Varianten zum Abbau abiotischer Ressourcen (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)

In Bezug auf den Abbau abiotischer Ressourcen (Abbildung 32) erzielen alle Varianten eine Netto-Belastung. Die geringsten Netto-Belastungen sind bei Variante C zu verzeichnen, mit einem Betrag von 1.914 kg Sb-Ä. Die größten Belastungen bei Variante C fallen durch die Produktion von neuem Asphalt an. Dies ist u.a. auf die verhältnismäßig hohe Menge an Asphalt zurückzuführen. Durch den entfallenden Rückbau von Leitungen in Variante C sind die Einsparungen durch „Metallrecycling“ und „Thermische Verwertung“ minimal. Variante B erzielt die zweithöchsten Netto-Belastungen, in Höhe von 2.906 kg Sb-Ä. Ebenso wie in Variante C sind die hohen Belastungen der Produktion von neuem

Asphalt zuzuschreiben. Die Einsparungen durch „Metallrecycling“ und „Thermische Verwertung“ belaufen sich auf knapp ein Drittel der Belastungen und tragen somit nur zu einer teilweisen Deckung der Belastungen bei. Das Ergebnis von Variante A unterscheidet sich nur minimal zu Variante B und erzielt eine Netto-Belastung von 2.984 kg Sb-Ä. Die Ergebnisse der einzelnen Prozesse sind wie bei Variante B zu interpretieren. Allgemein ist bei der gegebenen Wirkungskategorie zu erkennen, dass die Produktion von Asphalt die größte abiotische Ressourcenbelastung darstellt. Einsparende Prozesse, wie „Metallrecycling“ und „Thermische Verwertung“ führen hierbei nur zu einer geringen ausgleichenden Wirkung.

Die Ergebnisse der Wirkungskategorie kumulierter Primärenergieaufwand sind in Abbildung 33 dargestellt. Hier erzielt wiederum Variante B das beste Ergebnis, mit einer Netto-Belastung von 5.638.253 MJ Primärenergie. Die größten Belastungen entfallen auf die Produktion von neuen Metallen und in weiterer Folge auf die Asphaltproduktion. Die Primärenergie-Einsparungen durch das Recycling von Sekundärmetallen, sowie der thermischen Verwertung führen zu einer Kompensation von rund 17.094.101 MJ Primärenergieaufwand. Ein ähnliches Ergebnis wie in Variante B zeigt sich für Variante A – mit einer Netto-Belastung von 6.858.050 MJ Primärenergieaufwand. Auch hier sind die größten Belastungen auf die Produktion von neuen Metallen zurückzuführen. Ebenso tragen hier die Prozesse „Metallrecycling“ und „Thermische Verwertung“ zu einer massiven Einsparung von Primärenergie bei. Variante C verursacht die höchsten Netto-Belastungen, von rund 10.650.795 MJ Primärenergieaufwand. Hier lässt sich erneut die fehlende Kompensationswirkung durch die Rückgewinnung von Sekundärmetallen erkennen. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Prozesse „Neue Metalle“ und „Metallrecycling“ entscheidend für die Netto-Ergebnisse der Varianten sind. Für Varianten A und B ist aufgrund der markanten Belastungen durch die Produktion von neuem Asphalt kein positives Ergebnis erzielbar.

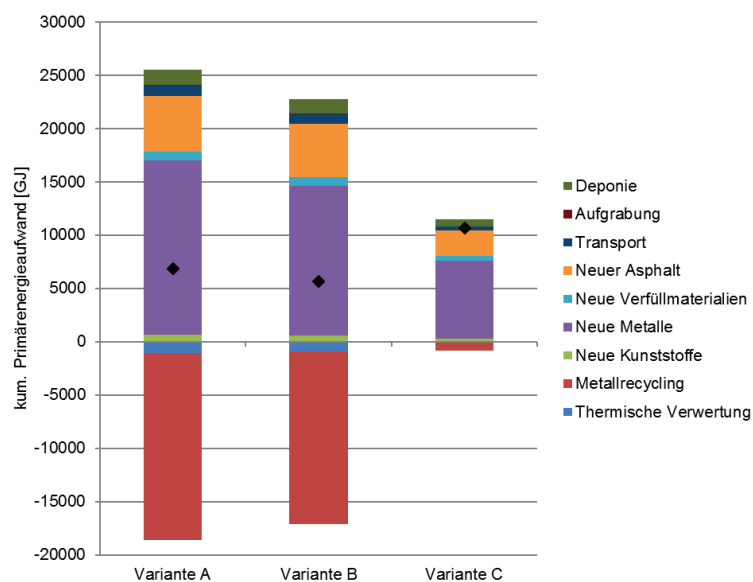


Abbildung 33 Kumulierter Primärenergiebedarf der Varianten (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass, bezogen auf die Wirkungskategorien „globale Erwärmung“ und „kumulierter Primärenergiebedarf“, Variante B am besten abschneidet und somit die zu bevorzugende Umbauvariante darstellt. Variante A erzielt in den zuvor genannten Wirkungskategorien die zweitbesten Ergebnisse. Variante C ist zwar in Bezug auf den Abbau von

abiotischen Ressourcen die belastungsärmste Variante, jedoch in Gesamtbetrachtung die ungünstigste Umbauvariante.

Die Prozesse „Metallrecycling“ und „Neue Metalle“ spielen in allen Wirkungskategorie-Ergebnissen eine entscheidende Rolle. So kann daraus abgeleitet werden, dass auch bei zukünftigen Trassenumbauten leitungsrückbau-integrierte Umbauvarianten ökologisch bevorzugte Alternativen darstellen. Ebenso zeigt sich, dass die Straßenoberfläche, und damit die Produktion von Asphalt, einen bedeutsamen Einfluss auf das Endergebnis hat. Dies lässt darauf schließen, dass je nach Straßenoberfläche auch andere Ergebnisse möglich wären.

In Abbildung 34 sind die Beiträge der einzelnen Varianten zu den Wirkungskategorien in normalisierter Form als Personenäquivalente dargestellt. Dabei lässt sich erkennen, dass der höchste Beitrag bei Variante C in der Wirkungskategorie „kumulierter Primärenergieaufwand“ zu finden ist, mit rund 142 Personenäquivalenten. Dieser Umstand ist auf die verhältnismäßig hohen Energieaufwendungen der Asphalt- und Primärmetallproduktion zurückzuführen. Im Vergleich dazu erzielen die Varianten A und B in dieser Wirkungskategorie Netto-Belastungen in der Höhe von 92 bzw. 75 Personenäquivalenten. Diese geringeren Netto-Belastungen sind auf die hohen Einsparungen des Metallrecyclings und der thermischen Verwertung zurückzuführen. Als zweitstärkste Wirkungskategorie erweist sich der abiotische Ressourcenabbau (zwischen 72 und 112 Personenäquivalente). Hierbei erzielt Variante C – im Gegenteil zu den zwei anderen Wirkungskategorien – die geringsten Netto-Belastungen (72 Personenäquivalente). Variante A erzielt die höchsten Netto-Belastungen (112 Personenäquivalente), dicht gefolgt von Variante B (109 Personenäquivalente). Ausschlaggebend für alle Variantenergebnisse dieser Wirkungskategorie ist die hohe Materialintensität, welche im Zuge der Trassenaufgrabung entsteht. Insbesondere der hohe Anteil an Metallen in den ein- und rückgebauten Kabeln trägt zu diesen hohen Ergebnissen bei, aber auch die hohen Mengen an Asphalt spielen hierbei eine entscheidende Rolle. Bei der Wirkungskategorie „globale Erwärmung“ erzielt Variante C die höchsten Netto-Belastungen, mit rund 78 Personenäquivalente. Diese sind im Vergleich zum abiotischen Ressourcenbedarf (72 Personenäquivalente) derselben Variante sogar höher. Variante B erzielt bei der Wirkungskategorie „globale Erwärmung“ die höchsten Netto-Einsparungen, mit -4 Personenäquivalente. Dies ist auf die ausgleichende Substitutionswirkung, der Verwertung von Sekundärmetallen, zurückzuführen. Variante A erzielt Netto-Belastungen in Höhe von 6 Personenäquivalenten.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Wirkungskategorien „abiotischer Ressourcenabbau“ und „kumulierter Primärenergiebedarf“ die stärksten Netto-Belastungen für alle Varianten aufweisen.

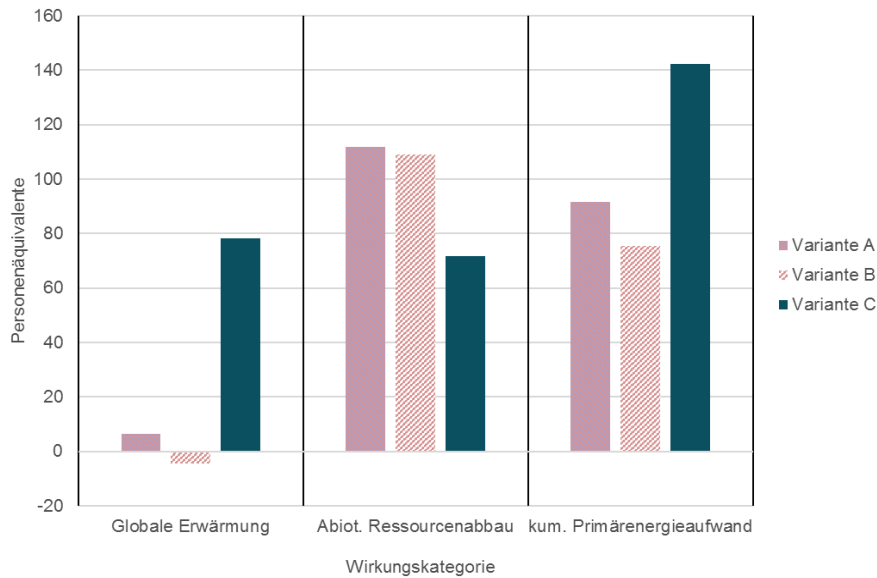


Abbildung 34: Vergleich der Varianten-Ergebnisse für die unterschiedlichen Wirkungskategorien ausgedrückt in Personenäquivalente (=entspricht dem Ressourcenverbrauch bzw. der Umweltbelastung einer durchschnittlichen globalen Person)

Durch Einbezug aller Ergebnisse lässt sich bestätigen, dass Variante B die ressourcen- und umweltschonendste Umbauvariante ist, und somit den anderen Varianten (A, C) vorzuziehen ist. Vor allem durch die effiziente Substitution von Primärrohstoffen schneidet diese Variante am besten ab.

Limitationen und Sensitivitätsanalyse

Die Erstellung der Wirkungsabschätzung basierte auf einigen Annahmen, die bei der Diskussion der Ergebnisse zu beachten sind. Im folgenden Abschnitt werden daher mögliche Limitationen und Unsicherheiten näher beleuchtet. Bei den ausgewählten Ökobilanzierungsdatensätzen (aus der ecoinvent- bzw. Gemis-Datenbank) ist zu beachten, dass es aufgrund der Vielzahl an Datensätzen und der damit auch einhergehenden Variabilität zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen kann. Da die Ergebnisse jedoch stets im selben Verhältnis stehen, kann davon ausgegangen werden, dass die beobachteten Trends bzw. die Reihungen der Varianten relativ robust sind.

Zur Überprüfung dieser Einschätzung wurde eine Sensitivitätsanalyse für die Prozesse „Neue Metalle“ und „Metallrecycling“ durchgeführt, da diese maßgeblich zu den Netto-Ergebnissen der Varianten beitragen. Im Zuge dieser Sensitivitätsanalysen wurde anhand der Wirkungskategorie „globale Erwärmung“ überprüft, wie sich die Variation ($\pm 10\%$ der jeweiligen Emissionswerte) der Ökobilanzdatensätze (Primär-/Sekundärstahl/-kupfer/-aluminium/-blei) dieser Prozesse auswirkt. Die daraus resultierenden Netto-Ergebnisse wurden mit den ursprünglichen Netto-Ergebnissen der Fallstudie verglichen und die Differenzen ermittelt. In Tabelle 12 sind die errechneten Differenzen in Prozent ausgewiesen. Es bestätigte sich, dass trotz Variation der Ökobilanzdatensätze keine Verschiebung der Reihung der Varianten stattfindet. Die größere Differenz von Variante A ($\pm 34\%$) im Vergleich zu Variante B ($\pm 25\%$) bei der Eingangsgröße „Primäraluminium“ ist darauf zurückzuführen, dass der Ökobilanzdatensatz für Primäraluminium im Vergleich zu anderen Metallen sehr hoch ist und somit die nur gering höhere Menge an eingebautem Aluminium bei Variante A (im Vergleich zu Variante B) eine stärkere Steigerung verursacht, als bei anderen Eingangsgrößen.

Tabelle 12: Sensitivitätsanalyse für die Ökobilanzdatensätze der einzelnen Eingangsgrößen der Prozesse "Metallrecycling" und "Neue Metalle". Die resultierenden Differenzen ($\pm \Delta$) sind in % dargestellt.

Globale Erwärmung	Variante A	Variante B	Variante C
Eingangsgröße ($\pm 10\%$)	Δ Netto-Ergebnis	Δ Netto-Ergebnis	Δ Netto-Ergebnis
Primärstahl	$\pm 29\%$	$\pm 36\%$	0%
Sekundärstahl	$\pm 6\%$	$\pm 8\%$	0%
Primärkupfer	0%	0%	0%
Sekundärkupfer	$\pm 2\%$	$\pm 3\%$	0%
Primäraluminium	$\pm 34\%$	$\pm 25\%$	$\pm 8\%$
Sekundäraluminium	$\pm 12\%$	$\pm 15\%$	0%
Primärblei	$\pm 67\%$	$\pm 89\%$	0%
Sekundärblei	$\pm 3\%$	$\pm 4\%$	0%

In Bezug auf die Zusammensetzung der Kabel ist ebenso eine gewisse Unsicherheit möglich, da die Informationslage zu alten Kabeln oftmals sehr ungenau ist. So lässt sich auch im untersuchten Straßenbahnbezirk nicht ausschließen, dass es zu Aufzeichnungslücken kam. Insbesondere Informationen zu den Kabelzusammensetzungen (Anzahl, Kabeltype) können fehleranfällig sein. Markante Abweichungen der Kabelzusammensetzung könnten dabei zu einem neuen Verhältnis der Endergebnisse von Variante A und B führen. Durch die Betrachtung von ausschließlich drei Wirkungskategorien können keine umfassenden Aussagen zu den ökologischen Auswirkungen bzw. Emissionen der drei Varianten gegeben werden. So wurde die Betrachtung der Ökotoxizität nicht miteinbezogen. Da die Fallstudie jedoch auf das Erkennen von potenziellen Einsparungen bzw. Belastungen in Bezug auf Ressourcen und Umwelt abzielte, sind die gewählten Wirkungskategorien ausreichend.

Modelltrassen

In Abbildung 35 sind die Beiträge der einzelnen Modelltrassen zur globalen Erwärmung dargestellt. Darin zeigt sich, dass einzig die Kabeltypen A und C mit Grünfläche als Straßenoberfläche Netto-Einsparungen erzielen (-94 bzw. -118 kg CO₂-Ä). Vergleichsweise dazu, erzielt die Modelltrasse mit Kabeltype B (ebenfalls Grünfläche) keine Netto-Einsparungen, sondern resultiert in einer Netto-Belastung von 42 kg CO₂-Ä. Dies lässt sich auf den vergleichsweise geringen Kupferanteil der Kabeltype B (im Vgl. zu Kabeltype C) zurückführen, welche dadurch zu verhältnismäßig geringen Einsparungen (durch Substitution von Primärkupfer) führt. Betrachtet man die Ergebnisse von den Modelltrassen mit Kabeltype A und C (Grünfläche) genauer, lässt sich erkennen, dass trotz gravierendem Unterschied zwischen den Metallanteilen der Kabel (Kabeltype A: 20 kg Al/ 100 m vs. Kabeltype C: 48 kg Cu/ 100 m), die Ergebnisse für Kabeltype A beinahe so hoch liegen, wie für Kabeltype C. Dabei lassen sich bei Kabeltype A die hohen Einsparungen bedingt durch die umweltschonendere Produktion von Sekundäraluminium im Vergleich zu Primäraluminium herauslesen. Die restlichen Modelltrassen mit Asphalt als Straßenoberfläche schließen alle mit Netto-Belastungen ab (zwischen 843 und 683 kg CO₂-Ä). Dies ist auf den Prozess „Neuer Asphalt“ zurückzuführen, welcher zu den größten

Umweltbelastungen führt. Ebenso stellt die Deponierung von Abfällen eine relevante Belastung bei den Modelltrassen mit Asphalt dar.

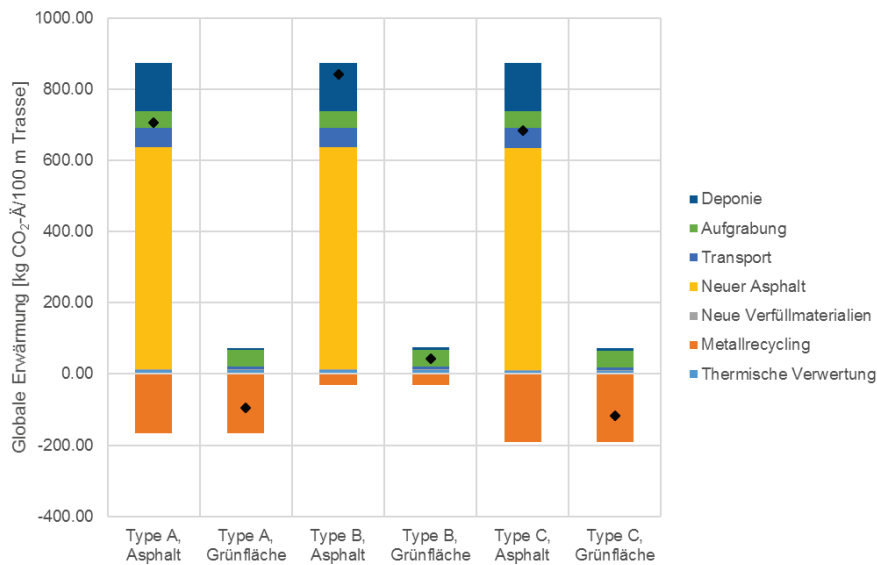


Abbildung 35: Beitrag der Modelltrassen (mit 1 Kabel) zur globalen Erwärmung, Tiefe: 0,8m (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)

Bei Abbildung 36 ist die Kabelanzahl von 1 auf 4 Kabel erhöht, was zur Folge hat, dass nun auch die Modelltrasse mit Kabeltype B (mit Grünfläche) Netto-Einsparungen in der Höhe von -20,20 kg CO₂-Ä erzielt. Bei allen anderen Modelltrassen mit Grünfläche lassen sich erhöhte Einsparungen feststellen. Die Modelltrassen mit Asphalt weisen nun geringere Netto-Belastungen auf, was auf das höhere Substitutionspotenzial der rückgewonnenen Sekundärmetalle zurückzuführen ist (siehe Prozess „Metallrecycling“). Im Gegenteil zu den Modelltrassen (Asphalt/ Grünfläche) mit Kabeltype A und C, sind die Einsparungen bei den Modelltrassen mit Kabeltype B nur minimal. Dies ist auf den niedrigen Kupfergehalt zurückzuführen.

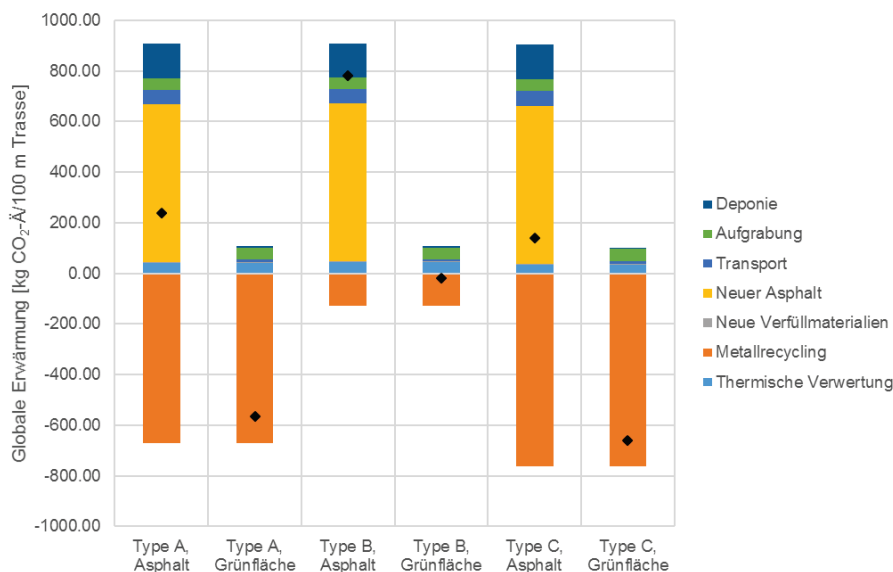


Abbildung 36 Beitrag der Modelltrassen (mit 4 Kabel) zur globalen Erwärmung, Tiefe: 0,8m (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)

In Anbetracht des Abbaus von abiotischen Ressourcen (Abbildung 37) ist – bis auf die Modelltrasse mit Kabeltype C (Grünfläche) – für alle Modelltrassen (mit 1 Kabel) eine Netto-Belastung festzustellen

(zwischen 0,03 und 20,69 kg Sb-Ä). Wie in den Ergebnissen zur Fallstudie „Straßenbahnbezirk“, stellt der Prozess „Neuer Asphalt“ die größte Aufwendung dar. Das Ergebnis der Modelltrasse mit Kabeltype C (Grünfläche) mit -0,93 kg Sb-Ä ist vor allem durch den relativ hohen Kupfergehalt der Kabel bedingt, welcher zu einer verhältnismäßig hohen Gutschrift führt. Es ist hervorzuheben, dass der abiotische Ressourcenbedarf von rückgewonnenen Aluminiumkabel (Type A) sehr gering ist. Dies ist durch die geringe abiotische Ressourcenbelastung bei der Sekundärproduktion von Aluminium bedingt und führt so zu geringen Gutschriften (Substitutionspotenzialen) bei dem Prozess „Metallrecycling“. Im Vergleich dazu hat Kupfer ein Substitutionspotenzial, dass um ein mehr als 6.000-faches höher liegt, als jenes durch die Substitution von Primäraluminium. Somit kann man generell festhalten, dass laut den Ergebnissen dieser Wirkungskategorie Kupferkabel aufgrund ihres erhöhten Einsparungspotenzials zu bevorzugen sind.

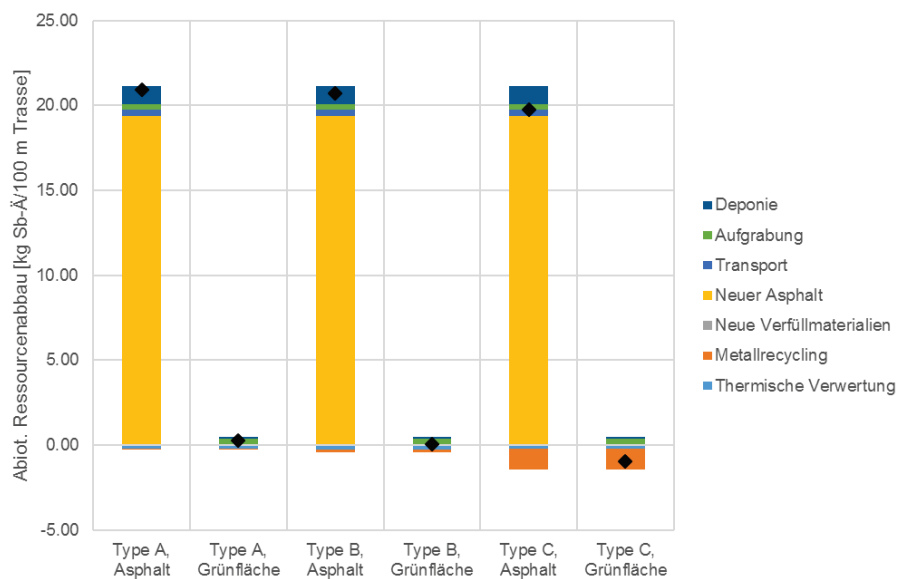


Abbildung 37: Beitrag der Modelltrassen (mit 1 Kabel) zum Abbau abiotischer Ressourcen, Tiefe: 0,8m (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)

Abbildung 38 zeigt die Ergebnisse für den Abbau von abiotischen Ressourcen für 4 Kabel der jeweiligen Kabeltype. Durch die erhöhte Kabelanzahl zeichnen sich nun auch für die Modelltrassen mit Kabeltype A und B (Grünfläche) positive Ergebnisse ab - mit Netto-Einsparungen von -0,39 bzw. -1,29 kg Sb-Ä. Die Modelltrassen mit Asphalt als Straßenoberfläche zeigen trotz erhöhter Kabelanzahl keine großen Veränderungen. So sind die Netto-Ergebnisse hauptsächlich von den Belastungen durch den Prozess „Neuer Asphalt“ beeinflusst. Es zeigt sich, dass die Einsparungen durch „Metallrecycling“ bei rückgewonnenen Kupferkabel (Kabeltype B und C) bedeutsam wachsen, wobei bei Aluminiumkabel (Kabeltype A) keine großen Veränderungen zu vernehmen sind. Dieser Trend deckt sich mit den zuvor getroffenen Annahmen zu den unterschiedlichen Substitutionspotenzialen von Aluminium und Kupfer und zeigt, dass auch bei erhöhter Kabelanzahl die prinzipiell niedrige abiotische Ressourcenbelastung bei Kabeln mit Aluminium zu keinen markanten Einsparungen führt.

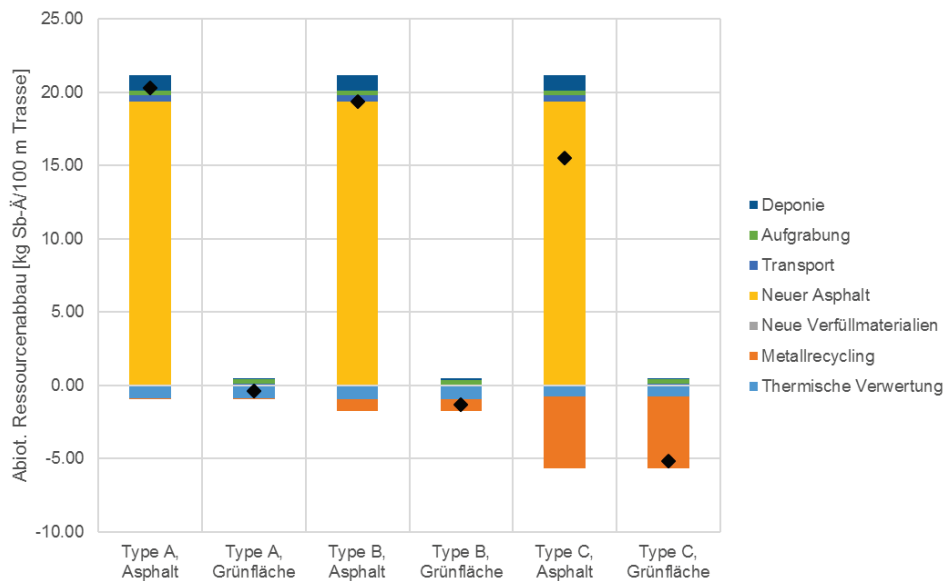


Abbildung 38: Beitrag der Modelltrassen (mit 4 Kabel) zum Abbau abiotischer Ressourcen, Tiefe: 0,8m (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)

In Abbildung 39 wird dargestellt, wie sich in Abhängigkeit von der Künettentiefe das Netto-Ergebnis der einzelnen Modelltrassen verändert. Dabei kann festgestellt werden, ab welcher Künettentiefe der Rückbau von stillgelegten Leitungen – bezogen auf die Wirkungskategorie „globale Erwärmung“ – erstrebenswert ist (= ökologischer Break Even Point⁵). Wie in den vorherigen Ergebnissen werden auch die Parameter Straßenoberfläche, Kabeltype und Kabelanzahl miteinbezogen. Die Netto-Ergebnisse zeigen, dass sich ein Rückbau von Kabeln bei den Modelltrassen mit Kabeltype A und C (mit jeweils 4 Kabel und Grünfläche als Straßenoberfläche) bis in eine Künettentiefe von 5 m als umweltschonend darstellt. Die Modelltrassen mit Kabeltype C (1 Kabel; Grünfläche) und A (4 Kabel; Grünfläche) erzielen bis zu einer Künettentiefe von rund 2,5 m ein umweltschonendes Netto-Ergebnis. Die Modelltrassen mit Kabeltype B (Grünfläche) und 1 bzw. 4 Kabel erzielen bis in eine Künettentiefe von ca. 1 bzw. 0,2 m Netto-Einsparungen. Alle anderen Modelltrassen mit Asphalt als Straßenoberfläche erzielen keine Netto-Einsparungen - unabhängig von der Tiefe. Dies ist, wie bereits beschrieben, vor allem auf die hohen Belastungen der Asphaltaufwendungen (Produktion, Deponierung) zurückzuführen. Prinzipiell kann festgehalten werden, dass der ökologische Break-Even-Point niedriger ist, je mehr Kabel rückgebaut werden und sofern Grünfläche als Straßenoberfläche gegeben ist.

⁵ Im Rahmen dieser Fallstudie wird mit Erreichen des *ökologischen Break Even Points* die erstmalige Erzielung von Netto-Einsparungen bei einer bestimmten Künettentiefe interpretiert.

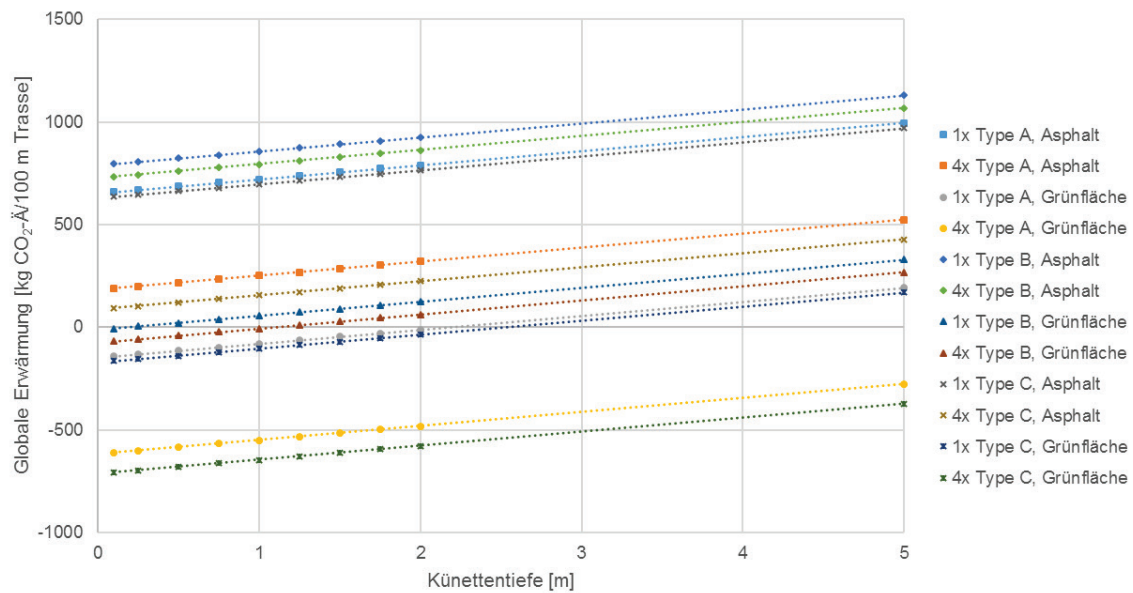


Abbildung 39: Beitrag der Modelltrassen (mit 1 oder 4 Kabel bzw. Asphalt oder Grünfläche) zur globalen Erwärmung in Abhängigkeit von der Künettentiefe

Die Ergebnisse der Modelltrassen zeigen, dass die betrachteten Faktoren (Kabeltype/-anzahl, Straßenoberfläche (Asphalt, Grünfläche) und Künettentiefe) maßgeblich zu den Ressourcen- und Umweltauswirkungen der einzelnen Varianten beitragen und somit deren Rückbaupotenzial bestimmen. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Resultaten der Studie von Krook et al. (2015), welche ebenfalls die genannten Faktoren als entscheidende Größen für die Umweltauswirkungen und die Rentabilität des Leitungsrückbaus identifizierten.

Limitationen

Wie in Fallstudie „Straßenbahnbezirk“ ist die Wirkungsabschätzung der Modelltrassen bezogen auf die gewählten Ökobilanzdatensätze mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Dennoch ist auch hier davon auszugehen, dass sich die Ergebnisse der einzelnen Modelltrassen nicht gravierend bei Auswahl anderer Ökobilanzdatensätzen verändern und verhältnismäßig gleiche Ergebnisse erzielen würden. Auch in der Wirkungsabschätzung zu den Modelltrassen könnten noch weitere Wirkungskategorien miteinbezogen werden (wie z.B. Ökotoxizität), jedoch sind auch hier die gewählten Wirkungskategorien ausreichend, um die Fragestellungen hinsichtlich Umweltbelastung zu bewerten.

Baustellenbesichtigungen

In den folgenden Abschnitten werden der Ist- und Plan-Zustand von erdverlegten Leitungen in Bezug auf ausgewählte Baustellenbereiche in Wien aufgezeigt, um daraus Erkenntnisse zur Zuverlässigkeit von digitalen, geografischen Leitungsdaten, sowie zu gegebenenfalls vorhandenen Urban Mining Potenzialen abzuleiten. Dafür werden die Aufzeichnungen zu den vorgefundenen Leitungen (= Ist-Zustand; RESUM) und die Leitungsinformationen laut dZLK (= Plan-Zustand; MA28) zusammen in detaillierten Grundrissen und Schnitten dargestellt. Zusätzlich wird, sofern Informationen der MA28 vorhanden sind, der Status der betroffenen Leitungen bestimmt. Hinweise zu den Darstellungen (Grundrisse und Schnitte): Die Aufzeichnungen von RESUM sind auf die Größe der jeweiligen Aufgrabung (= braun schattiert) beschränkt. In den Schnitten sind nur die Daten von RESUM

dargestellt, da der dZLK keine kontinuierlichen Informationen zu den Tiefen der Leitungen liefert. Generell unterliegen die Daten des dZLK einer gewissen Unsicherheit bezüglich der Anzahl und Lage (im cm-Bereich; zwischen 5-300 cm) der Leitungen. Die dargestellten Leitungen der MA28 stellen immer die erste, hauswandnächste Leitung (= „Erstleitung“) dar. Weitere dazugehörige/ artgleiche Leitungen, die parallel oder ober-/unterhalb der Erstleitung liegen, werden mit der Erstleitung zusammengefasst dargestellt und in der Anzahl addiert. Die geometrischen Aufzeichnungen von RESUM unterliegen ebenfalls einer gewissen Ungenauigkeit (im cm-Bereich). Die Leitungsanzahl wird ebenso zusammengefasst dargestellt.

In Abbildung 40 ist der Ist-/ Plan-Zustand von Baustelle 1 dargestellt. Die strichlierten Linien stellen dabei Aufzeichnungen vom Projektteam (RESUM) dar und die durchgezogenen Leitungslinien entsprechen jenen im dZLK der MA28. Das prinzipiell hohe Aufkommen an Leitungen kann u.a. durch die verkehrsrelevante, innerstädtische Lage der Aufgrabung erklärt werden und somit der verstärkten Verkabelung vor Ort. Es zeigte sich, dass die vorgefundenen Leitungen größtenteils unbekannt sind und diese daher nicht näher identifiziert werden können. Deutliche Übereinstimmungen mit dem dZLK zeigten sich bei Telekommunikations- und Lichtsignalanlageleitungen. Die sensiblen Leitungen laut dZLK (diese stellen Schutzeinrichtungen oder spezielle unterirdische Bauwerke dar) wurden ebenso aufgefunden, wenn auch in abweichender Anzahl. So kann bei den unbekanntenen Leitungen (laut RESUM) angenommen werden, dass es sich hierbei auch um sensible und/oder Telekommunikations- bzw. Lichtsignalleitungen handelt. Generell dokumentieren die dZLK-Aufzeichnungen der MA28, dass alle Leitungen in Betrieb sind. Da bei den überzähligen, unbekanntenen Leitungen jedoch davon auszugehen ist, dass diese zum Großteil nicht mehr aktiv bzw. stillgelegt sind, ergibt sich bei dieser Aufgrabung ein erhöhtes Urban Mining Potenzial. Es wäre jedoch notwendig herauszufinden, wer der/die Betreiber*innen dieser mutmaßlich stillgelegten/inaktiven Leitungen ist/sind. Die vorgefundenen Leitungen zeigten generelle Abweichungen zu jenen Lageangaben der MA28, wenn auch nur im cm-Bereich. Dieser Umstand untermauert die angesprochene Unsicherheit bezüglich der identifizierten Leitungsarten.

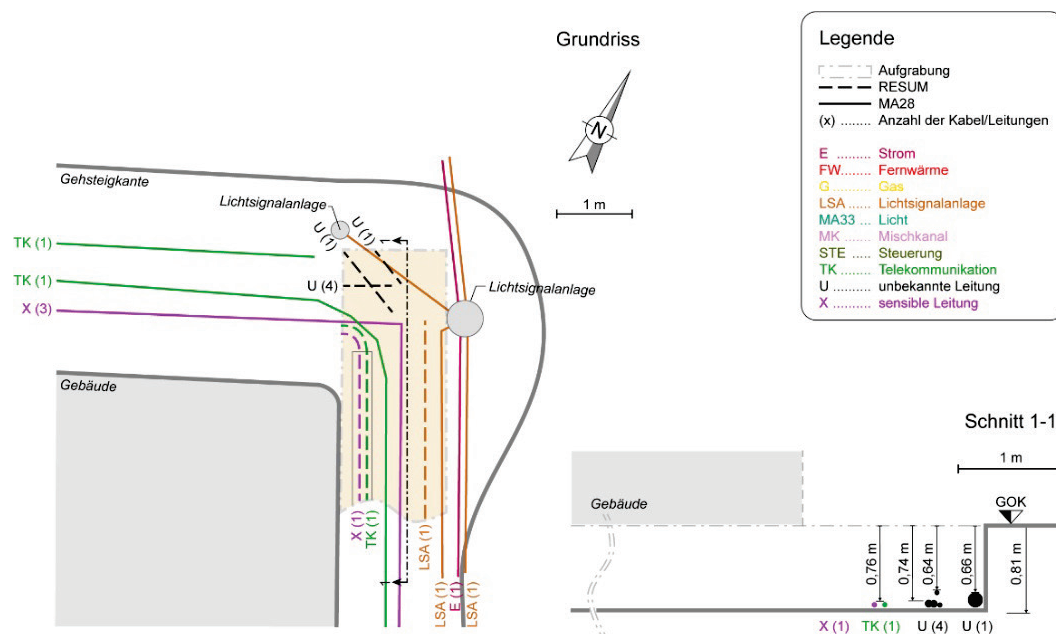


Abbildung 40: Baustelle 1: Ist-/Plan-Zustand der erhobenen Aufgrabung im Vergleich zu den dZLK Daten der MA28.

In Abbildung 41 ist die Bestandsaufnahme von Baustelle 2 abgebildet. Hierbei handelt es sich - wie bei Baustelle 1 - um einen wichtigen Verkehrspunkt Wiens. Die Leitungen laut dZLK wurden alle vor Ort aufgefunden, wenn auch teilweise in abweichender Anzahl. Im Zuge der Aufgrabungen kamen bei dieser Baustelle jedoch einige außerplanmäßige Leitungen/ Einbauten zum Vorschein. So wurden zwei stillgelegte/ inaktive Gasleitungen festgestellt, welche im Zuge der Arbeiten demontiert werden mussten. Ebenso traten zusätzliche Telekommunikationsleitungen, sowie eine unbekannte Leitung (u.a. in einem Streifenfundament verbaut) auf, die nicht im dZLK vermerkt waren. Laut Auskunft der MA28 ist die nordwestlichste Telekommunikationsleitung, sowie die Telekommunikationsleitung neben der Gasleitung außer Betrieb. Bei der nordwestlichen Telekommunikationsleitung könnte es sich jedoch auch um eine inaktive Reserveleitung handeln, welche bewusst im Zuge der TK-Leitungsneuerlegung (= TK-Leitung nahe der Gehsteigkante) belassen wurde. Bei der zweiten nicht in Betrieb befindlichen Telekommunikationsleitung (neben der Gasleitung) könnte es sich um eine totgelegte Leitung handeln, welche durch eine neue Leitung ersetzt wurde. Diese neue Telekommunikationsleitung könnte der von RESUM festgestellten zweiten TK-Leitung entsprechen. Das Urban Mining Potenzial bei dieser Baustelle liegt daher vor allem bei den stillgelegten/ inaktiven Gasleitungen, sowie den inaktiven/ totgelegten Telekommunikationsleitungen. Bei der verbauten, unbekanntem Leitung wäre eine weitere Auskundschaftung notwendig, da es sich auch um eine wichtige, sensible (aktive) Leitung handeln könnte. Generell sind nur minimale Lageunterschiede zwischen den MA28 und RESUM Aufzeichnungen festzustellen.

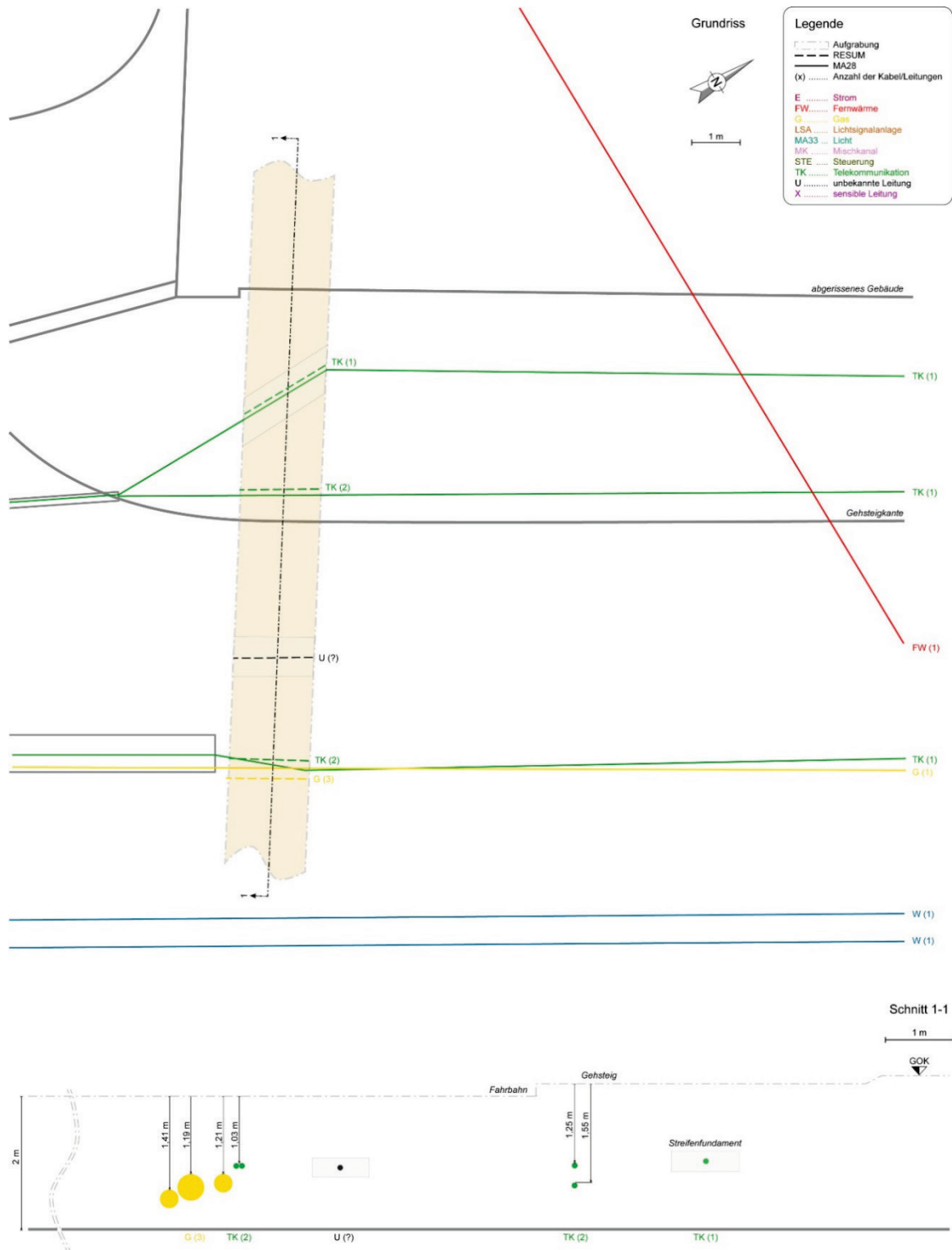


Abbildung 41: Baustelle 2: Ist-/Plan-Zustand der erhobenen Aufgrabung im Vergleich zu den dZLK Daten der MA28.

Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen die zwei Aufgrabungen (Bereich 1 und 2) zu Baustelle 3, welche zwei innerstädtische Seitengassen betreffen. Im ersten Bereich der Baustelle (Abbildung 42) handelt es sich um eine Gehsteigaufgrabung (um einen Hydranten). Hierbei wurden die Leitungsarten laut dZLK festgestellt. Da die Anzahl der sensiblen Leitungen starke Unterschiede (7 statt 3 Leitungen) zu den von RESUM erfassten Leitungen aufweisen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass es sich hierbei nicht auch um andere Leitungsarten (z.B. Strom oder Telekommunikation) handelt. Laut MA28 sind die drei planmäßigen, sensiblen Leitungen in Betrieb. Daraus könnte geschlossen werden, dass für die vier

weiteren sensiblen/ unbekanntem Leitungen ein potenzielles Urban Mining Potenzial besteht, sofern sich diese tatsächlich als stillgelegt/ inaktiv erweisen. Die erhobenen Lagen der Leitungen stimmen mit jenen im dZLK überein.

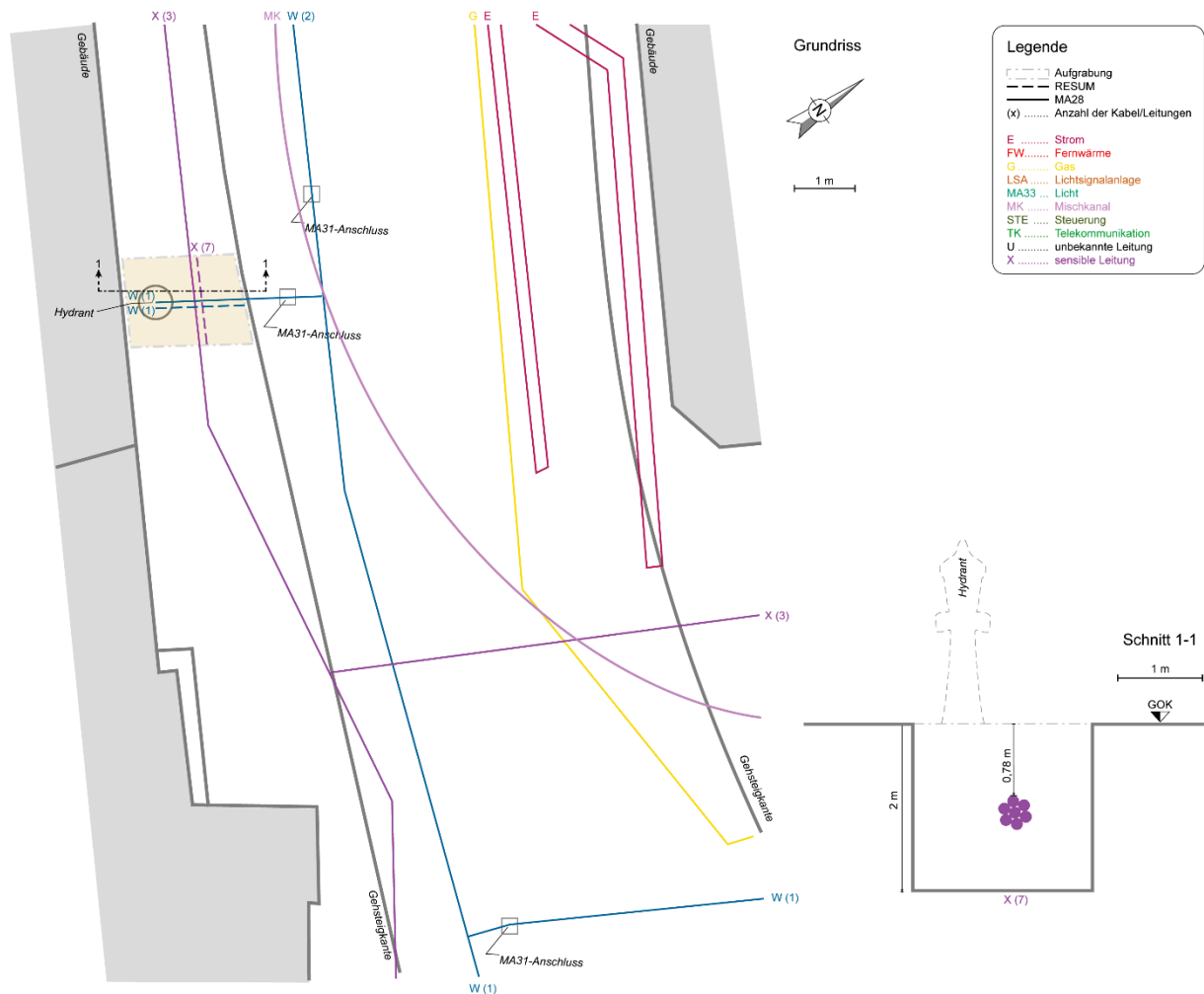


Abbildung 42: Baustelle 3 - Bereich 1: Ist-/Plan-Zustand der erhobenen Aufgrabung im Vergleich zu den dZLK Daten der MA28.

In Abbildung 43 ist der zweite Bereich von Baustelle 3 dargestellt. Der Großteil der Leitungen konnte konform dZLK festgestellt werden. Bei der Telekommunikationsleitung wurden allerdings zwei Leitungen, statt nur einer Leitung aufgenommen. Es könnte sich hierbei um eine stillgelegte/ inaktive Leitung handeln, da auch der dZLK die einzig planmäßige TK-Leitung als „nicht in Betrieb“ führt. Die zweite von RESUM festgestellte TK-Leitung könnte ebenso eine inaktive Leitung sein, oder eine bisher noch nicht vom dZLK erfasste, neue TK-Leitung darstellen. Alle anderen Leitungen (Gas, Wasser) dieser Aufgrabung sind laut MA28 aktiv. Das Urban Mining Potenzial würde sich somit bei dieser Aufgrabung auf die zusätzliche Telekommunikationsleitung beschränken. Bei dieser Aufgrabung wurden erhebliche Unterschiede bei der Lage der einzelnen Leitungen verzeichnet (siehe Telekommunikations- und Wasserleitungen in Abbildung 43).

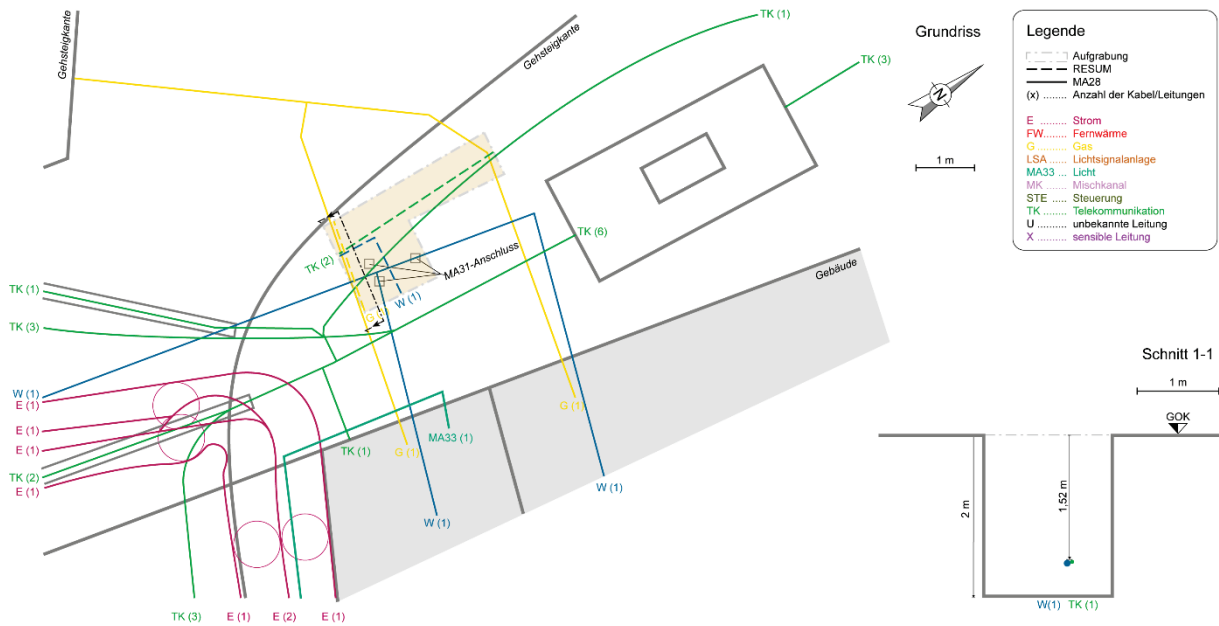


Abbildung 43: Baustelle 3 - Bereich 2: Ist-/Plan-Zustand der erhobenen Aufgrabung im Vergleich zu den dZLK Daten der MA28.

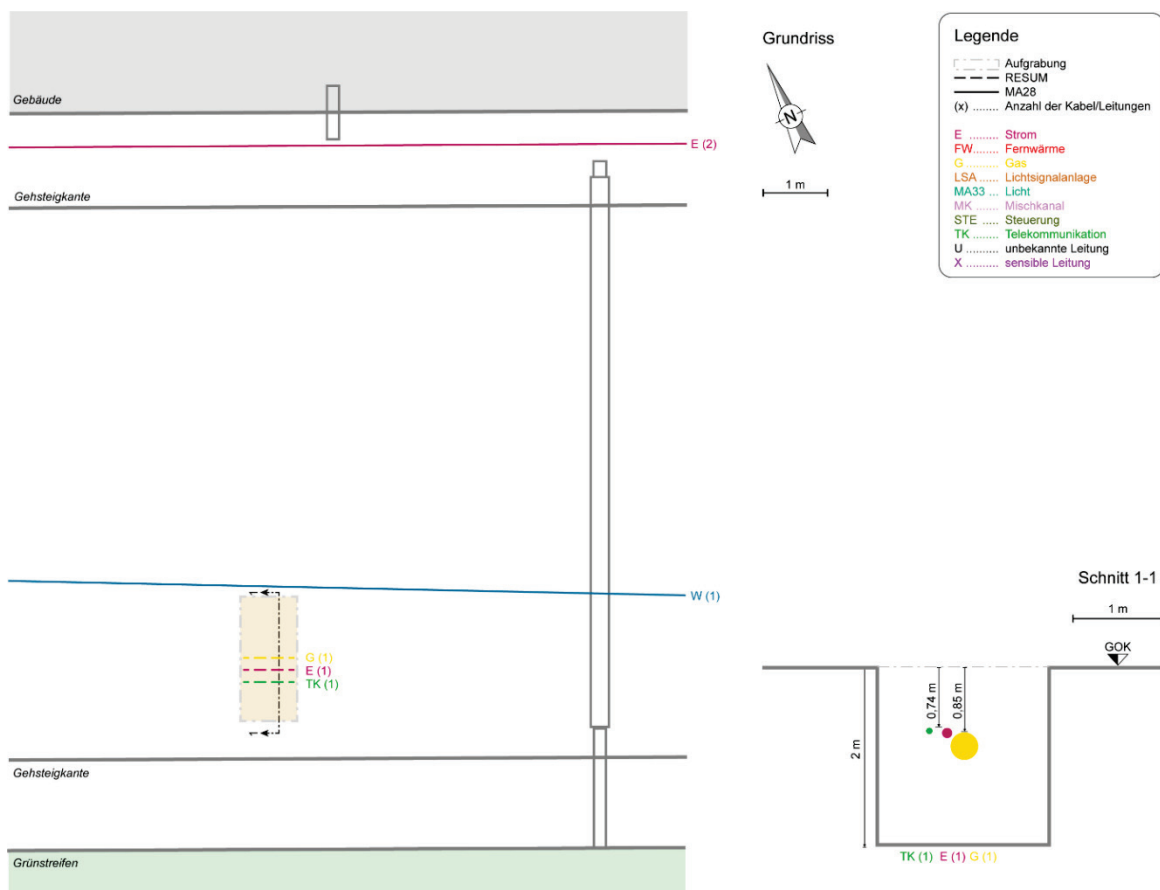


Abbildung 44: Baustelle 4: Ist-/Plan-Zustand der erhobenen Aufgrabung im Vergleich zu den dZLK Daten der MA28.

In der Abbildung 44 ist die Aufzeichnung zu Baustelle 4 dargestellt. Die vorgetroffene Aufgrabung betraf einen Parkstreifen, da durch eine spezielle Bohrtechnologie die Aufgrabung im Gehsteigbereich ausgespart werden konnte. Hierbei wurden ausschließlich außerplanmäßige Leitungen festgestellt. Es lässt sich vermuten, dass die Leitungen aktiv sind. Dies weist auf eine erhebliche Informationslücke in

den Daten des dZLK hin. Dies könnte auf eine unstete Datenübermittlung der Netzbetreiber*innen oder auf zeitliche Verzögerungen in der Aktualisierung dieser Informationen durch die MA01 (vormals MA14) hinweisen.

Die Aufzeichnungen zu Baustelle 5 sind in Abbildung 45 festgehalten. Hierbei sind die vorgefundenen Leitungen mit den Informationen aus dem dZLK übereinstimmend. Alle betroffenen Leitungen sind laut MA28 in Betrieb und stellen somit kein Urban Mining Potenzial dar. Der Mischkanal ist in einer tieferen Ebene anzunehmen und konnte daher nicht vorgefunden werden. Für diese Aufgrabung ist daher eine vollkommene Übereinstimmung zwischen den RESUM und MA28 Daten festzustellen. Dies gilt auch für die geometrischen Informationen.

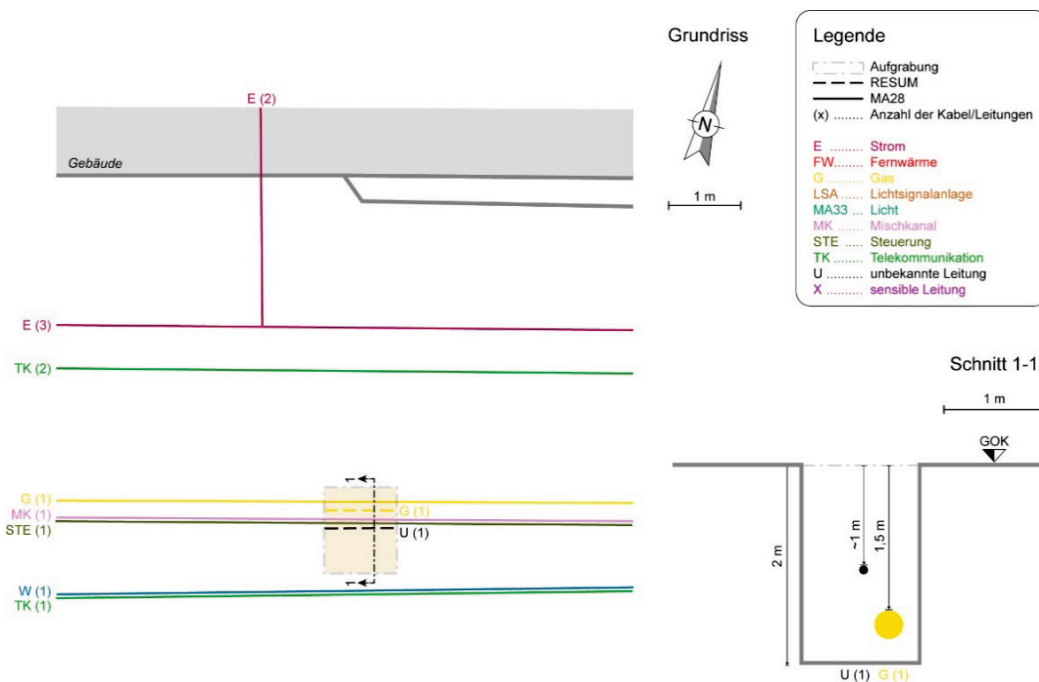


Abbildung 45: Baustelle 5: Ist-/Plan-Zustand der erhobenen Aufgrabung im Vergleich zu den dZLK Daten der MA28.

Die Ergebnisse der Baustellenbesichtigungen zeigen, dass trotz der relativ kleinen Auswahl an Baustellen, stillgelegte/ inaktive Leitungen festgestellt werden konnten, die im Zuge von Urban Mining Projekten rückgewonnen werden könnten. Das Urban Mining Potenzial scheint in verkehrsstarken und innerstädtischen Gegenden höher zu sein, als z.B. in peripheren Gebieten. Vor allem bei Telekommunikationsleitungen (TK) scheint ein beachtliches Urban Mining Potenzial gegeben zu sein, da bei mehreren Aufgrabungen eine (im Vergleich zum dZLK) höhere Anzahl an TK-Leitungen festgestellt werden konnte, was darauf schließen lässt, dass es sich hierbei um stillgelegte/ inaktive, und damit potenziell rückgewinnbare TK-Leitungen handeln könnte. Auch die Daten der MA28 zeigten, dass vor allem bei TK-Leitungen „nicht in Betrieb“ befindliche Leitungen vorkommen. Dieser Umstand könnte mit der anhaltenden technologischen Anpassung im Bereich der Telekommunikation erklärt werden, die eine Verlegung von moderneren TK-Leitungen erfordert. Dass hierbei alte Leitungen meist im Erdreich zurückgelassen werden, war dabei bisher Praxis. Stromleitungen waren nur bei einer der erfassten Aufgrabungen vorhanden, wodurch für diese Leitungskategorie keine repräsentativen Einschätzungen getroffen werden können. Ein relevantes Urban Mining Potenzial könnte sich bei den „unbekannten“ Leitungen ergeben, da sich bei diesen teilweise keine vernünftige Zuordnung zu den gegebenen dZLK Informationen finden ließ, und somit als stillgelegt/ inaktiv betrachtet werden könnten.

Es zeigte sich zudem, dass die Informationen des dZLK teilweise markante Unterschiede bezüglich Lage und Anzahl der Leitungen im Vergleich zu den von RESUM aufgenommenen Daten aufweisen. Dies ist unter anderem auf die oftmals spärliche Datenübermittlung zurückzuführen, welche (meist) nur den Mindestanforderungen (Leitungsart/-anzahl und Lagegenauigkeit⁶) nachkommt. Dieser Umstand wirkt sich wiederum negativ auf die Planbarkeit von Rückgewinnungsvorhaben aus. Hierbei könnte ein integriertes/ zusätzliches System Abhilfe schaffen, über welches Attribute zu den Leitungen (Lage, Status, Anzahl, Material) genauer durch den Netzbetreiber aufgezeichnet werden.

Eine weitere Erkenntnis der Baustellenerhebungen bezieht sich auf die vorgefundenen Leitungstiefen. So variieren diese für die verschiedenen Leitungsarten zwischen 0,6 und 1,6 m (von der Geländeoberkante gemessen). Telekommunikationsleitungen sind dabei stets oberflächennaher verlegt, als Leitungen wie Gas und Wasser. Verglichen mit den Ergebnissen der Modelltrassen mit Asphaltoberfläche lässt sich bei diesen Tiefen annehmen, dass sich bei einem reinen Rückbauvorhaben keine Umwelteinsparungen erzielen lassen würden. Dennoch könnte ein integrierter Rückbau zu geringeren Umweltbelastungen und damit zu einem Zusatznutzen führen.

Die Materialzusammensetzung der Kabel konnte nur bei Leitungen aufgezeichnet werden, welche im Zuge der Aufgrabungsarbeiten aufgeschnitten wurden. Hierbei wurden vorwiegend Kupfer- und Aluminiumkabel festgestellt. Generell wurden jedoch mehr Aluminiumleiter ermittelt. Die Kabel setzten sich teilweise aus mehreren Litzenbündel zusammen.

3.2.2.4 Ansätze für Urban Mining: Herausforderungen, Anreize und Empfehlungen

Herausforderungen

Erdverlegte Leitungen bzw. Kabel sind durch ihre unterirdische Lage erschweren Rahmenbedingungen ausgesetzt. So führen auch nur kleine Aufgrabungstätigkeiten in der Regel zu Verkehrsbehinderungen. Insbesondere Leitungsarbeiten innerhalb des Stadtgebietes sind mit enormen Aufwendungen für Planung und Durchführung verbunden. Die Koordinierung mit den zuständigen Behörden ist daher meist eine der ersten Schritte im Zuge von Aufgrabungstätigkeiten. Die Planung von Aufgrabungstätigkeiten beginnt meist mit der internen und/oder externen Datenerhebung zu Informationen wie der Lage und Art der auftretenden Kabel (eigene und fremde). Der Zugriff auf öffentliche Leitungsverzeichnisse, wie beispielsweise dem digitalen Leitungskataster (dZLK) der Magistratsabteilung 28 - Straßenverwaltung und Straßenbau (MA28), stellen hierbei wertvolle Informationsquellen dar. Gegebenenfalls nötige Verkehrsumleitungen/-sperrungen sind rechtzeitig behördlich zu beantragen. Trotz umfassender Informationsbeschaffung kann es dennoch zu starken Abweichungen bei den vorgefundenen Leitungen bzw. Kabeln kommen. So kommt es häufig vor, dass die Lage der fremden/ eigenen Leitung/en stark variiert. Ebenso treten im Zuge der Aufgrabungen oftmals stillgelegte/ inaktive Leitungen hervor, die nicht planmäßig verzeichnet sind. Die Aufgrabungen können auch durch (nicht planmäßige) Bauwerke, wie z.B. Teile von Streifenfundamenten, erschwert werden, da solche Elemente meist nicht in leitungsbezogenen Verzeichnissen vermerkt sind. Die unsichere öffentliche/interne Informationslage zu erdverlegten Leitungen lässt daher viele Netzbetreiber*innen davon abkommen alte/stillgelegte Leitungen auszubauen. Informationen zu der geometrischen Lage (hier vor allem der Tiefe) der Leitung/en

⁶ Bei der Angabe der Lagegenauigkeit gibt es drei von der MA28 vorgeschriebene Kategorien: $\pm 5\text{-}20\text{ cm}$; $\pm 50\text{-}100\text{ cm}$; $\pm 300\text{ cm}$.

können stark limitierende Faktoren bei der Planung von integrierten Rückbauprojekten sein. Bereits kleine Abweichungen bezüglich der Lage von Leitungen können zu erheblichen Mehrkosten im Gesamtprojekt führen. Dieser Umstand wirkt sich auch negativ auf die Umsetzung von integrierten Rückbauprojekten aus, da angefragte Projektpartner*innen nicht willig sind, dieses Risiko mitzutragen. Ebenso ist die Bereitschaft, andere Netzbetreiber*innen in der Nähe von eigenen Leitungen arbeiten zu lassen nicht immer gegeben, da unvorhersehbare Beschädigungen der eigenen Leitungen durch Dritte nicht auszuschließen sind. Die Kooperation mit anderen Netzbetreiber*innen unterliegt daher einer grundsätzlichen Zurückhaltung und führt folglich auch zu Vorbehalten bei integrierten Rückbauprojekten. Weiters sind der hohe Platzbedarf von Aufgrabungsbaustellen und die damit verbundenen Verkehrsbehinderungen ein maßgeblicher Faktor, Umbauprojekte nur in wesentlichen Fällen durchzuführen. So besteht vor allem in zentralen, innerstädtischen Gebieten ein erheblicher Platzmangel, der die Aufgrabungstätigkeiten zusätzlich erschwert. Notwendige Verkehrssperren werden von Projektleitern so kurz als möglich geplant, da sich diese ansonsten auch noch verstärkt auf die Projektkosten auswirken (z.B. durch zusätzliche Pauschalen für Wochenendarbeiten).

Der Ausbau der Kabel kann entweder durch klassisches Ausgraben oder mittels Zuhilfenahme von modernen Technologien, wie „Kabel-X“ passieren. Kabel-X ist eine Verlegungsalternative, bei der durch Einbringen einer gleitfähigen Flüssigkeit zwischen Leiter und Ummantelung die gewünschten Leiter herausgezogen und ersetzt werden können (Kabel X 2018). Bei beiden Varianten ist auf die sorgfältige und schadenfreie Rückgewinnung der Kabel zu achten. Nach Freilegung der gewünschten Kabel werden diese einer stofflichen Verwertung zugeführt. Dies inkludiert zunächst die Trennung zwischen den wertvollen, metallischen Leitern (meist Kupfer und Aluminium) und der Ummantelung bzw. Isolierung (meist aus Kunststoffen, wie PVC und PE). Die mechanische Aufbereitung dieser Materialien erfolgt durch spezialisierte Kabelverwertungsunternehmen. Dies beinhaltet weiters Verfahren wie z.B. Shreddern, Magnetabscheidung oder Windsichtung (Salzburger et al. 2001). Nach der mechanischen Aufbereitung gelangen die Granulate in eine Metallhütte oder direkt in die industrielle Weiterverwendung. Noch vor dem Durchlaufen der Verwertungsprozesse wird die Qualität und Wertigkeit der vorliegenden Kabel bestimmt. So sind es vor allem Kupfer- und Aluminiumleiter, die sich am wertvollsten darstellen. Alte Kabel, die eine haftmassegetränkte Papierisolierung oder eine Bleiummantelung aufweisen, stellen dabei geringwertigere Varianten dar. Die Wertigkeit der gewonnenen Metalle richtet sich jedoch stark nach den aktuellen Sekundärrohstoffpreisen, welche näher im Folgeabsatz behandelt werden.

Wie bereits ökonomische Bewertungen zeigen, lässt sich der Rückbau von stillgelegten Kabel meist nicht rentabel realisieren (Krook et al. 2011, Wallsten et al. 2015). Den hohen Aufwendungen und möglichen Komplikationen im Zuge des (integrierten) Leitungsrückbaus stehen dabei nur geringe Gewinne aus der Sekundärrohstoffverwertung (Metalle und Kunststoffe) gegenüber. So unterliegt der Sekundärrohstoffmarkt (z.B. für Aluminium und Kupfer) preislichen Schwankungen und zugleich hohen Qualitätsansprüchen. Der ökologische Mehrwert von Sekundärrohstoffen (durch Recycling und thermische Verwertung) wird dabei außer Acht gelassen. Ausnahmen stellen dabei einzig Rückbauprojekte dar, bei denen Kabel mit einer hohen Kupferkonzentration rückgewonnen werden (Wallsten 2015). Wallsten et al. (2015) folgerten daraus, dass vor allem die hohen Aufgrabungskosten und die (relativ) niedrigen Sekundärrohstoffpreise für die Rentabilität des Kabelrückbaus ausschlaggebend sind. Um den hohen Aufgrabungskosten zu entgegnen, empfehlen die Studienautoren daher einen „integrierten Rückbau“ von Kabeln zu forcieren. Bezüglich der Preislage von Sekundärrohstoffen lassen sich allerdings schwer allgemeine Trends ableiten, da diese stets von den aktuellen Marktverhältnissen abhängen. So lässt sich in Anbetracht der letzten zehn Jahre (nach

dem Crash Ende 2008) beobachten, dass die Sekundärrohstoffpreise für Aluminium und Kupfer starken Schwankungen unterlagen (LME 2018) und dadurch zu erwartende Erlöse mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Dennoch kommen durch die global fortschreitende Erschöpfung von Primärrohstoffen immer mehr Initiativen (z.B. das Europäische Kreislaufwirtschaftspaket) hoch, die zu einer Stärkung des Sekundärrohstoffmarktes führen. Dass sich dies auch im Zusammenhang mit Kabel zeigt, ist z.B. den Ergebnissen des VinylPlus Berichts zu entnehmen, welcher zeigt, dass die Rückgewinnung von PVC aus Kabeln allgemein eine relevante Größe für das Gesamtrecycling von PVC spielt und stetigen Zuwächsen unterliegt (VinylPlus 2018).

Zudem hängt die operative Planung von Rückbauprojekten stark von Lebensdauer und Instandsetzungsaufwand des jeweiligen Kabels ab. Daher werden Kabel meist erst nach mehreren Jahrzehnten rückbaufällig (Randacher 2017) und sind zu diesem Zeitpunkt bereits buchhalterisch abgeschrieben. Für viele Netzbetreiber*innen ist das Auflassen von inaktiven Leitungen nicht immer zweckmäßig, da diese noch als Reservesystem (für zukünftige Umbauten/ Sanierungen) herangezogen werden, sofern die notwendige Netzleistung noch von den betroffenen Leitungen erbracht wird. Dennoch lässt sich erwarten, dass insbesondere durch Umsetzung von neuen Technologien, wie z.B. der Breitbandinitiative, der Ausbau von stillgelegten/ inaktiven Kabel von höherer Relevanz werden könnte. Dies ist auch in Anbetracht des (dadurch) immer kleiner werdenden Platzvermögens im Straßenbau zu erwarten.

Es lässt sich aus diesen Erkenntnissen schließen, dass die Planung und Rentabilität des Rückbaus von stillgelegten/ inaktiven Kabel von mehreren Faktoren abhängt, die teilweise kaum beeinflussbar sind. Daher sollte an der Optimierung von Rückbauprojekten gearbeitet werden. Ein spezieller Fokus liegt hier auf dem „integrierten Rückbau“, der vor allem eine bessere Vernetzung und Absprache zwischen Netzbetreiber*innen voraussetzt.

Die nachhaltige Bewirtschaftung von erdverlegter Netzinfrastruktur ist im Einklang mit den Europäischen Zielen in Bezug auf Abfall- und Kreislaufwirtschaft (siehe Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle). Ein starker Fokus der Europäischen Gemeinschaft liegt dabei auf der Verminderung von Abfällen durch die Weiterverwendung von Altprodukten oder die Verwertung und das Recycling von Abfällen. Vor diesem Hintergrund ist auch der Rückbau von Kabeln aus erdverlegter Netzinfrastruktur zu betrachten, da hier durch effiziente Verwertung von Kabeln das Abfallaufkommen minimiert und zugleich Sekundärrohstoffe rückgewonnen werden. Die generellen Rahmenbedingungen für den Umgang mit Abfällen (Verwertung und Recycling) sind dem österreichischen Abfallwirtschaftsgesetz zu entnehmen (AWG 2002), welches konform RL2008/98/EG implementiert wurde (Europäische Parlament 2008). Diese allgemein gültigen Vorgaben sind sinngemäß auch auf rückgewinnbare Kabel anwendbar. Gemäß § 4 des AWG 2002 ist das Führen eines Abfallverzeichnisses vorgeschrieben. Kabel tragen laut dieser Bestimmung die Schlüsselnummer „35314“ (das Pendant auf EU-Ebene: 170408) mit einer zusätzlichen Unterscheidung für gefährlich kontaminierte Kabel. Zudem sind Schlüsselnummern für einzelne Metalle ausgewiesen, wie z.B. für Kupfer (35310) und Aluminium (35304). Auf Europäischer Ebene gibt es zudem Verordnungen für die spezielle Bewertung von Metallschrotten (Kupfer, Eisen, Stahl und Aluminium), um zu vermeiden, dass verwertete Schrotte nicht weiter als Abfälle bewertet werden und somit – bei Erfüllung bestehender Verwertungs- und Qualitätskriterien – wieder in den Markt eingespeist werden (Europäischer Rat, 2011; Europäische Kommission, 2013). In den zutreffenden Verordnungen regelt Abschnitt 3.3. des Anhang 1 die Behandlung von Kabeln aus Schrott. Für die standardisierte Verwertung von Kabeln können auch ÖNORMEN herangezogen werden, um dadurch eine vergleichbare Qualität zu gewährleisten. So gibt es für Schrotte aus

Aluminium und Kupfer (z.B. ÖNORM EN 13920-3 und ÖNORM EN 12861) fachgerechte Empfehlungen zur Verwertung dieser Schrotte, welche auch Ansätze für Kabelschrotte beinhalten (Austrian Standards, 2003, 2018).

Genauere Regelungen betreffend dem Rückbau von stillgelegten Kabeln lassen sich vor allem auf Bundeslandebene finden. In Wien sind Vorschriften zur Behandlung von stillgelegten Kabeln den „Allgemeinen Geschäftsbedingungen (AGB) für Aufgrabungen und Wiederinstandsetzungen“ der MA28 zu entnehmen (MA 28 2017). Darin ist in Abschnitt 1 Pkt. 7 geregelt, dass stillgelegte Leitungen bzw. Kabel „... *umgehend auf Kosten des Leitungsbetreibers aus ...*“ der Trasse zu entfernen sind. Der Leitungsbetreiber hat jedoch - bei Einverständnis der MA28 - die Möglichkeit, diese Leitungen auch zu einem späteren Zeitpunkt kostenpflichtig auszugraben. Die Wiener Regelungen sind hierbei im Vergleich zu anderen Regelwerken äußerst progressiv zu bewerten und stellen somit eine Vorreiterrolle für rechtliche Urban Mining Ansätze dar. Durch diese gesetzliche Diskontinuität kommt es in den meisten Fällen zu keinem Rückbau von stillgelegten/ inaktiven Leitungen. Dies ist auch durch den derzeit noch ausreichenden Platz im unterirdischen Raum möglich, welcher den Neubau von Trassen begünstigt.

Abschließend ist festzuhalten, dass die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Verwertung von Kabeln gegeben sind. Außerdem sind Bestimmungen zum Rückbau von stillgelegten Kabeln auf Bundeslandebene zu finden. Es ist anzumerken, dass die bundesländer-bezogenen Vorschriften zum Rückbau von stillgelegten Leitungen nicht einheitlich sind. Aufgrund der fehlenden Gesetzeslage zu Urban Mining Ansätzen wird daher weiterhin die Machbarkeit von Rückbauprojekten primär von monetären Überlegungen abhängen und so zu einem mehrheitlichen Verbleib im Erdreich führen. Es besteht somit ein ungenutztes Sekundärrohstoffpotential im Netzinfrastrukturbereich, das in Anbetracht der Strategie für ein ressourceneffizientes Europa oder auch im Sinne des Europäischen Kreislaufwirtschaftspaketes stärker genutzt werden sollte.

Anreize und Empfehlungen

Der ökologische Mehrwert durch die Schonung von Umwelt und Ressourcen sollte bei der Durchführung von zukünftigen (integrierten) Rückbauprojekten beachtet werden. Netzbetreiber*innen sollten als Teil der Kreislaufwirtschaft gesehen werden und hier eine wichtige Schnittstelle zwischen Produzent*innen und Abfallverwerter*innen einnehmen. Dieses Bewusstsein sollte durch politische Strategien gefördert werden, wobei primär Anreize geschaffen werden sollten, alle Beteiligten eigenständig dazu motivieren alte/ stillgelegte Leitungen rückzugewinnen. Erste Anreize könnten hierbei die Schaffung einer verbesserten Sekundärrohstoffmarktlage sein. Dies könnte durch eine faire Preispolitik und gleichwertige Qualitätsansprüche erzielt werden. Derzeit unterliegen Sekundärrohstoffe im Wettbewerb mit billigen Primärrohstoffen, wobei dies auch dem Umstand zu schulden ist, dass bei der momentanen Preisgestaltung, die unterschiedlichen Umwelt- und Ressourceneinsparungen von Sekundärrohstoffen nicht miteinkalkuliert sind. Eine ökologisch-orientierte Preisgestaltung könnte somit auch zu einer erhöhten Rentabilität von Rückbauprojekten führen. Ebenso könnte durch gleichwertige Qualitätszertifikate sichergestellt werden, dass Sekundärrohstoffe besser am Markt positioniert werden können.

Da den niedrigen Erträgen aus dem Rückbau von Leitungen hohe Aufwendungen durch die notwendigen Aufgrabungstätigkeiten gegenüberstehen, sollten vermehrt Konzepte wie der integrierte Rückbau von Leitungen umgesetzt werden. Diese Rückbauvariante sieht vor, dass im Zuge des Aufgrabungsprojektes allen potenziell betroffenen Netzbetreiber*innen die Möglichkeit eingeräumt

wird, eigene Umbauarbeiten im Verlauf der Baustelle zu tätigen. Dies hat zur Folge, dass die Kosten für die Aufgrabungstätigkeiten zwischen den Akteur*innen aufgeteilt werden und so zu beidseitigen Kosteneinsparnissen führen. Solche Projekte werden jedoch nur unter der Voraussetzung funktionieren, dass die Kommunikation verbessert wird. Hierfür ist die (Weiter-)Entwicklung eines interaktiven Leitungskatasters notwendig, welcher als Schnittstelle zwischen den Netzbetreiber*innen und der öffentlichen Verwaltung fungiert. Durch die Adaptierung des Leitungskatasters sollte die Kontaktaufnahme unabhängig von der Größe des Bauvorhabens erleichtert werden. Hierbei sollte auch die Aufzeichnung von Daten zu Leitungen verbessert werden, um so eine sichere Informationslage für zukünftige Rückbauprojekte zu gewährleisten. Dies setzt eine lückenlose Datenübermittlung durch Netzbetreiber*innen zu Informationen wie der Leitungstiefe, -zusammensetzung, -anzahl, -aktivität voraus. Mit dieser Informationsgrundlage könnten auch zukünftige Urban Mining Potenziale besser geplant werden.

In letzter Instanz sollten auch bundesweit einheitliche Regelungen zum verpflichtenden Rückbau von stillgelegten/ inaktiven Leitungen angedacht werden. Vorbild hierfür könnten die neuen AGBs der MA28 sein (Magistratsabteilung 28 – Straßenverwaltung und Straßenbau, 2017). Ein erster Anknüpfungspunkt für eine bundesweite Implementierung von Urban Mining Ansätzen für stillgelegte Leitungen könnte u.a. die Verordnung für Recycling-Baustoffe (RBV 2015) darstellen, welche die Pflichten bei Bau- und Abbrucharbeiten, die Trennung von dabei anfallenden Abfällen und die Herstellung von Recycling-Baustoffen regelt. Hierbei könnten spezifische Urban Mining Vorschriften integriert werden, die eine Verpflichtung zum Rückbau/Ausbau von stillgelegten Leitungen bei Aufgrabungen, sowie eine gegebenenfalls notwendige Feststellung der Netzbetreiber*innen- bei unbekanntem, alten Leitungen vorsieht.

Im Zuge dessen könnten auch ökonomische Vorteile für die Durchführung von Rückbauprojekten eingeführt werden. Diese könnten im Rahmen von finanziellen Bonusstufen angedacht werden, die in Abhängigkeit von der Projekt-/Aufgrabungsgröße ausgestellt werden.

3.2.2.5 Fallstudien-spezifische Fragestellungen

Die spezifischen Fragestellungen, die im Rahmen der Fallstudie behandelt wurden, werden nachfolgend beantwortet.

2A Wo ergeben sich die größten Ressourcen- und Energieeinsparungen bei der Rückgewinnung von erdverlegten Kabeln?

Die größten ökologischen Einsparungen ergeben sich durch die einsparungswirksame Verwertung von Sekundärrohstoffen aus rückgewonnenen Leitungen (siehe Ergebnisse zur Fallstudie „Straßenbahnbezirk“). Relevante Prozesse hierfür sind die thermische Verwertung von Kunststoff/ Papier und das Metallrecycling von Kabelleitern (Kupfer, Aluminium, etc.). Der dabei entstehende Einsparungseffekt ist auf die hohe Substitutionswirkung von Sekundärrohstoffen, welche als Ersatz von Primärrohstoffen herangezogen werden können, zurückzuführen. So ist beispielsweise die Produktion von Sekundäraluminium um ein rund 17-faches umweltschonender, als die Produktion von Primäraluminium. Diese Einsparungen haben in Folge eine ausgleichende Wirkung auf die relativ hohen Belastungen, die durch den Aus-/ Einbau von Leitungen entstehen. Dieser ausgleichende Effekt ist jedoch nicht bei jeder ökologischen Wirkungskategorie zu beobachten, so zeigt sich etwa beim „abiotischen Ressourcenabbau“, dass die Prozesse „Thermische Verwertung“ und „Metallrecycling“ nur relativ geringe Einsparungen erzielen. Ursache dafür ist das in dieser Wirkungskategorie relativ

geringe Substitutionspotenzial von Sekundärmetallen (in Bezug auf die Primärproduktion), welches somit nur zu sehr geringen Einsparungen durch Metallrecycling führen kann. Hierbei können kleinere Umbauvarianten, die einen reinen Neubau von Leitungen vorsehen, sogar bessere Ergebnisse als (integrierte) Rückbauvarianten erzielen. Dennoch ist die prinzipielle, ökologische Vorrangigkeit von (integrierten) Rückbauvarianten aufgrund der eingangs erwähnten Einsparungspotenziale hervorzuheben.

2B Welche Rahmenbedingungen begünstigen die Rückgewinnung von erdverlegten Kabeln?

Durch die Ergebnisse der Fallstudie wurde ersichtlich, dass sich vor allem die Faktoren Kabelzusammensetzung und Straßenoberfläche maßgeblich auf das (ökologische) Rückgewinnungspotenzial von Leitungen auswirken. Insbesondere die Kabelzusammensetzung und damit das Vorkommen von bestimmten Metallen beeinflusst das Einsparungspotenzial von Rückbauvarianten entscheidend. Insofern ist festzustellen, dass Kabel mit einem hohen Kupfer- und Aluminiumanteil erhöhte Rückbaupotenziale verursachen. Je höher sich der Anteil dieser Metalle gestaltet, desto größer können die erzielbaren ökologischen Einsparungen (und deren Substitutionswirkung) angenommen werden. Die Straßenoberfläche ist ein weiterer zu berücksichtigender Faktor, da sich zeigte, dass dieser zu hohen Ressourcen- und Umweltbelastungen führen kann. Rückbauprojekte auf Grünflächen gestalten sich daher am rentabelsten, wohingegen Projekte mit z.B. Asphaltflächen zu markanten Netto-Belastungen von Ressourcen und Umwelt führen. Dies ist auf die hohen Aufwendungen (Abtrag/ Neuauftrag von Asphalt, Deponierung und Transport von Asphalt) bei Leitungsaufgrabungen mit Asphaltstraßenoberflächen zurückzuführen.

Weiters führen niedrige Einbautiefen von Leitungen (< 1m), sowie ein schwaches Verkehrsaufkommen im Bereich der Baustelle (dezentrale Verkehrslage) zu erleichterten Rückbaubedingungen. Generell ist festzuhalten, dass der Erfolg von Rückbauprojekten stark von der bestehenden öffentlichen/ internen Informationslage abhängt. So können z.B. Abweichungen in der Lage der Leitung/en zu massiven Mehrkosten führen. Eine adaptierte Form des bestehenden Leitungskatasters wäre hierbei notwendig, um eine bessere Informationslage für zukünftige Urban Mining Projekte zu schaffen.

2C Mit welcher Unsicherheit ist die Informationslage zu erdverlegten Leitungen behaftet?

Aufgrund der komplexen Informations- und Verantwortungslage bei erdverlegter Netzinfrastruktur ist die Datenlage zu Leitungen oftmals mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Insbesondere Informationen zu Lage, Anzahl und Status von Leitungen können starken Abweichungen unterliegen, welche in Folge zu erheblichen Mehrkosten im Gesamtprojekt führen können. Hierbei kann generell zwischen zwei Arten von Unsicherheiten unterschieden werden: den *planmäßigen* und den *außerplanmäßigen* Unsicherheiten. Bei planmäßigen Unsicherheiten handelt es sich im Wesentlichen um Informationslücken zwischen Netzbetreiber*innen und/oder öffentlichen Leitungsverwaltern. Auch wenn alle aufgefordert sind, sämtliche Daten zu den eingebauten Leitungen zu übermitteln, kann es dennoch zu Übertragungslücken kommen.

Des Weiteren kann es trotz vorhandener (interner und/oder öffentlicher) Informationslage zu sogenannten außerplanmäßigen Unsicherheiten kommen, indem sich erst bei der tatsächlichen Aufgrabung zeigt, dass vorgetroffene eigene/ fremde Leitungen nicht der eigentlichen Planauskunft entsprechen und so zu möglichen Komplikationen im Baustellenbetrieb führen. Aufgrund dieser bestehenden Unsicherheiten sollten Maßnahmen getroffen werden, welche zunächst zu einer

Risikominderung von planmäßigen Unsicherheiten führen. Dabei sollte eine Überarbeitung von öffentlichen Netzinformationen angestrebt werden, die jedoch auch eine lückenlose Datenübermittlung voraussetzt. Sofern diese planmäßigen Unsicherheiten behoben werden können, sollte sich in Folge auch für außerplanmäßige Unsicherheiten eine Besserung einstellen.

2D Welche Barrieren und Hemmnisse gilt es im Urban Mining von erdverlegten Netzwerken zu überwinden, um den Rückbau von stillgelegten Leitungen im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu optimieren?

In einem ersten Schritt sollte die Informationslage zu erdverlegten Leitungen verbessert werden, da diese für Netzbetreiber*innen eine der größten Unsicherheiten in Bezug auf Rückbauprojekte darstellt. Aufgrund der teilweise gravierenden Abweichungen bezüglich Lage, Anzahl und Status von Leitungen in der Informationslage ziehen Stakeholder*innen es meist vor, Leitungen im Untergrund zu belassen. Eine Neuauflage des Leitungskatasters sollte demnach kontinuierliche Daten zu Lage, Anzahl, Status und bestmöglich auch Zusammensetzung von Leitungen beinhalten, da diese wesentlichen Faktoren bei der Planung von Rückbauvarianten darstellen und daher eine erfolgreiche Rückgewinnung begünstigen. Zudem sollte eine bessere Vernetzung zwischen den Netzbetreiber*innen (unabhängig von der Aufgrabungsdimension) gefördert werden, da sich dadurch erleichterte Bedingungen beim Planungsprozess, sowie vor Ort im Baustellengeschehen einstellen würden. Insbesondere die Identifizierung von unbekanntem Leitungen könnte so leichter von statten gehen und nicht wie bei derzeitiger Praxis zu ungewissen Betriebsrisiken führen. Des Weiteren könnten auch sogenannte „integrierte“ Rückbauprojekte besser geplant werden und die dabei anfallenden Aufgrabungskosten zwischen den beteiligten Akteur*innen aufgeteilt werden.

Die derzeit niedrigen Sekundärrohstoffpreise sollten, sofern gleiche Qualitäten zu Primärrohstoffen erzielt werden, an Primärrohstoffpreise angeglichen werden, um so zu einer fairen Preispolitik zu führen. Dies würde im Anklang an die ökologische Mehrwertigkeit zu einer rentableren Bewertung von Rückgewinnungsprojekten führen. In letzter Instanz sollten auch gesetzliche Verbindlichkeiten zum Rückbau von alten/ stillgelegten Leitungen angedacht werden, welche gemäß dem Kreislaufwirtschaftsgedanken eine verstärkte Wiederverwendung von Sekundärrohstoffen bewirken würde. Als Vorlage dafür könnten die neuen AGBs der Stadt Wien - MA28 (Magistratsabteilung 28 – Straßenverwaltung und Straßenbau, 2017) dienen, welche den ausnahmslosen Rückbau von totgelegten Leitungen auf Kosten der Netzbetreiber*innen vorschreibt. Im Ausgleich zu den verpflichtenden Rückbaumaßnahmen könnte ein Urban Mining Fördersystem geschaffen werden, indem z.B. eine verminderte Abgabenlast für Aufgrabungstätigkeiten für die Netzbetreiber*innen geschaffen wird.

3.2.3 Fallstudie 3: Ressourceneffiziente Bewirtschaftung von Gebäuden

3.2.3.1 Einleitung

Der Bau- bzw. Gebäudesektor zählt zu den größten Ressourcenkonsumenten. In Österreich gehen knapp 50 % des gesamten Rohstoffverbrauchs in den Baubereich (BMLFUW 2015). Außerdem sind private Haushalte für rund ein Viertel des gesamten Endenergieverbrauchs verantwortlich, wovon wiederum mehr als zwei Drittel zum Heizen von Gebäuden eingesetzt werden (Umweltbundesamt 2018). Dieser Rohstoffeinsatz im Bausektor hat dazu geführt, dass eine signifikante Menge an unterschiedlichsten Baumaterialien im Gebäudebestand angehäuft wurde. So beträgt das Materiallager in Österreichs Gebäuden über 2.000.000.000 Tonnen oder 250 Tonnen pro Einwohner

(EW) (Daxbeck et al. 2009). Dieses Materiallager hat in der Vergangenheit kontinuierlich zugenommen und wächst derzeit um ca. 9 Tonnen pro EW und Jahr (vgl. Abbildung 46). Im Vergleich dazu liegt die jährliche Menge an Bau- und Abbruchabfällen bei knapp einer Tonne pro EW (BMNT 2017), da Baumaterialien/ -produkte für mehrere Jahrzehnte genutzt werden und somit erst verzögert als Abfälle anfallen.

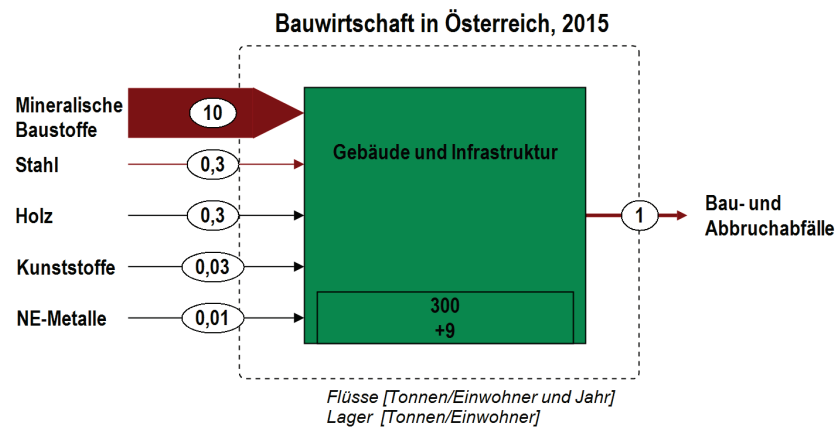


Abbildung 46: Materialbilanz für den Bausektor in Österreich im Jahr 2015. Eigene Berechnungen basierend auf (Daxbeck et al. 2009, Cullen et al. 2012, BMLFUW 2015, Kleemann et al. 2016, BMNT 2017, Van Eygen et al. 2017). Werte sind auf eine signifikante Stelle gerundet.

Die in der Vergangenheit stetig gestiegenen Baumaterialmengen werden zukünftig auch zu einem entsprechenden Anstieg von Alt-Bauprodukten und Abbruchmaterialien führen. Bau- und Abbruchabfälle wurden daher auch auf europäischer Ebene als bedeutender Abfallstrom identifiziert (European Commission 2017), da in diesem Bereich ein hohes Potential für Recycling besteht (das weiter steigen wird) und Optionen für die hochwertige (Weiter)Nutzung der anfallenden Materialien vorhanden sind. Dies gilt besonders für Hochbauten, da diese eine Vielzahl an Materialien (Metalle, Holz und Kunststoffe, Ziegel und Beton) enthalten, die bei geeigneter Bewirtschaftung einer Wiederverwendung oder einem Recycling zugeführt werden können. Außerdem befinden sich fast 50 % des anthropogenen Materiallagers in Gebäuden und Infrastruktur in Hochbauten (120 Tonnen pro Kopf, vgl. Daxbeck et al. 2009), wodurch dieses Lager eine bedeutende Rohstoffquelle darstellt (Lichtensteiger et al. 2008). Aufgrund der großen Bedeutung des Bausektors für den Materialumsatz und des hohen Rohstoffpotentials von Gebäuden ist es notwendig, Strategien zu entwickeln, um Ressourcen in Alt-Gebäuden effizient und nachhaltig zu nutzen.

Die gegenständliche Fallstudie hat das Ziel, die Ressourceneffizienz der Bewirtschaftung von Gebäuden am Ende ihrer Lebensdauer für ausgewählte Maßnahmen zu bewerten und Potentiale zur Steigerung der Material- und Energieeffizienz zu identifizieren. Am Beispiel eines Modell-Projektes auf dem Areal des Franz-Josefs-Bahnhofs in Wien werden unterschiedliche Varianten zur Nutzung des vorhandenen Ressourcenpotentials eines Altgebäudes verglichen. Die Effekte einer Kernsanierung und Weiternutzung des Tragwerkes sowie unterschiedlicher Abbruch- und Rückbaumethoden in Bezug auf Umweltbelastungen und Ressourcenschonung werden anhand von Szenarien analysiert und Rückschlüsse zu optimalen Bewirtschaftungsszenarien für Altgebäude gezogen. Folgende spezifischen Fragestellungen werden durch die Fallstudie behandelt:

- 3A Für welche Bewirtschaftungsvarianten ergeben sich die größten Effizienzpotenziale durch die Verwertung bestehender Gebäude am Beispiel des untersuchten Projektes?
- 3B Welche ökologischen Effekte (Umweltbelastungen und Ressourcenschonung) werden durch unterschiedliche Nutzungs- und Rückbaustrategien erzielt?
- 3C Welche Ansätze sind geeignet, um eine ressourceneffiziente Bewirtschaftung von Altgebäuden zu fördern?

3.2.3.2 *Material und Methoden*

Die Energie- und Materialflüsse über den gesamten Lebenszyklus im Rahmen der Fallstudie werden anhand von Ökobilanzen (gemäß (ISO 14040 2006)) erfasst und bewertet. Zunächst wird das Untersuchungssystem definiert und die funktionale Einheit (Grundlage für den Vergleich der verschiedenen Szenarien) festgelegt. Anschließend werden die Daten zu allen relevanten Energie- und Materialflüssen über den Produktlebenszyklus erhoben. Dies geschieht einerseits anhand von Primärdaten, die sich direkt auf das Fallstudienobjekt beziehen und andererseits anhand von Literaturdaten, einschlägiger Ökobilanz-Datenbanken (z.B. ecoinvent v3.3, (Ecoinvent Association 2017)) und Datenplattformen für die Ökobilanzierung von Bauwerken (z.B. ÖKOBAUDAT, (BBR 2018)). Schließlich wird das Untersuchungssystem anhand ausgewählter Wirkungskategorien in Bezug auf Ressourcenschonung (Indikatoren: kumulierter Primärenergieaufwand, abiotischer Ressourcenverbrauch) und Umweltauswirkungen (Indikator: globale Erwärmung) bewertet.

Untersuchungsrahmen und funktionale Einheit

Die funktionale Einheit für den Vergleich der Szenarien bildet die Bereitstellung eines Stahlbetontragwerkes für ein Gebäude mit einem Bruttorauminhalt (BRI) von 131.691 m³ ausgehend von einem Modell-Altgebäude dieser Größe im Althanviertel des 9. Wiener Gemeindebezirks. Es werden unterschiedliche Varianten betrachtet, um die funktionale Einheit zu erfüllen (vgl. Abbildung 47):

- Variante 1: Entkernung und Weiternutzung des bestehenden Tragwerks
 - Szenario 1A → Entkernung mit relativ niedriger Trennschärfe
 - Szenario 1B → Entkernung mit hoher Trennschärfe und Bauteilwiederverwendung
- Variante 2: Abbruch des bestehenden Gebäudes und Neubau des Tragwerks
 - Szenario 2AA → Abbruch (niedrige Trennschärfe) und neues Tragwerk identisch
 - Szenario 2AB → Abbruch (niedrige Trennschärfe) und neues Tragwerk anders
 - Szenario 2BA → Rückbau (hohe Trennschärfe) und neues Tragwerk identisch
 - Szenario 2BB → Rückbau (hohe Trennschärfe) und neues Tragwerk anders

Das Modell-Altgebäude befindet sich teilweise über den Gleisanlagen des Franz-Josefs-Bahnhofs und wurde bis Ende 2013 als Bürogebäude genutzt. Nach dem Nutzungsende wurde das Gebäude entkernt und bis auf die Stahlbetonkonstruktion rückgebaut. Dementsprechend repräsentiert Variante 1 die tatsächliche Bewirtschaftung des Gebäudes, während Variante 2 die Alternative durch Abriss des gesamten Altgebäudes und Neubau des Tragwerkes darstellt. Die weiteren Baumaßnahmen (nach der Bereitstellung des Tragwerks) zur zukünftigen Nutzung des Gebäudes als Wohngebäude mit ca. 270 Wohnungen werden in den Varianten nicht berücksichtigt, da sich die Szenarien auf die Bewirtschaftung des Altgebäudes und nicht auf die Gestaltung des Neugebäudes beziehen.

Nichtsdestotrotz sei jedoch darauf hingewiesen, dass je nach Szenario eine mehr (Variante 1) oder weniger (Variante 2) starke Abhängigkeit zwischen der Ausführung des Alt- und des Neubäudes besteht und diese Abhängigkeit die Ressourceneffizienz des Neubäudes beeinflussen kann.

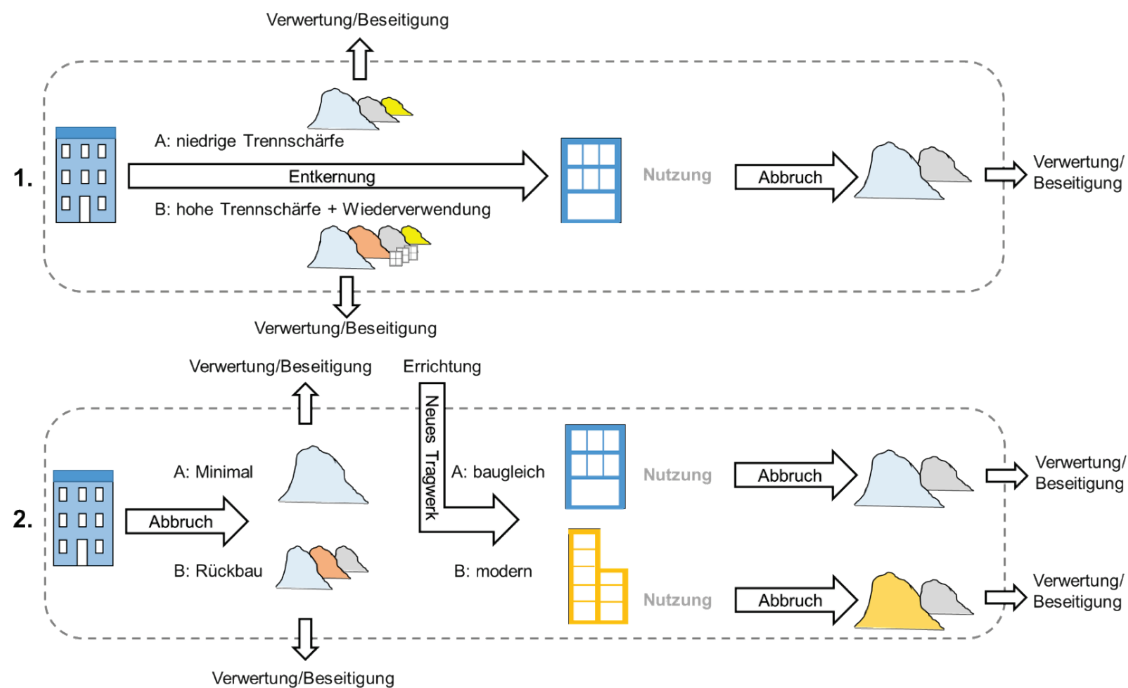


Abbildung 47: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Szenarien zur Bewertung des Effektes unterschiedlicher Maßnahmen (Kernsanierung vs. Abbruch und Neubau) im Rahmen der Fallstudie

Der Vergleich der unterschiedlichen Bewirtschaftungsszenarien erfolgt unter Berücksichtigung der Material- und Energieflüsse über den gesamten Lebenszyklus. Das vordergründige Untersuchungssystem umfasst die Flüsse in direktem Zusammenhang mit der Entkernung/dem Abbruch des Altgebäudes, der Neuerrichtung des Tragwerks (Variante 2), sowie dem Abbruch des Stahlbetontragwerks am Ende der Lebensdauer. Für dieses Vordergrund-System werden Materialflussanalysen nach Brunner et al. (2016) erstellt. Der Konsum von Materialien und Energie, der Aufwand für Aufbereitung, Verwertung und Entsorgung der anfallenden Abfälle, sowie der Nutzen durch Recycling und Wiederverwendung werden anhand von Ökobilanzdaten aus entsprechenden Datenbanken abgebildet (=Effekte im Hintergrundsystem). Zur Berücksichtigung des Nutzens durch Recycling und Wiederverwendung wird ein Systemerweiterungsansatz gewählt (European Commission 2010) und der vermiedene Aufwand durch die Substitution der alternativen Produktion wird als Gutschrift in der Bewertung berücksichtigt. Die Substitution erfolgt basierend auf der funktionalen Äquivalenz von Sekundär- und Primärprodukten auf dem Markt, so wird z.B. durch Sekundärkupfer aus Kupferschrott die gleiche Menge an Primärkupfer aus Kupfererz auf dem Markt ersetzt. Im Rahmen der Ökobilanz wird durch die Bereitstellung eines Sekundärproduktes jeweils das äquivalente marginale Primärprodukt ersetzt (=Konsequenz-orientierte Ökobilanz).

Material- und Energieflüsse (Sachbilanz)

Im Rahmen der Sachbilanz werden alle relevanten Material- und Energieflüsse für die verschiedenen Bewirtschaftungsszenarien bilanziert und die damit in Verbindung stehenden Ressourcenverbräuche und Emissionen erfasst. Zunächst wird die Zusammensetzung des Modell-Altgebäudes beschrieben und die Materialeffizienz der unterschiedlichen Entkernungs- und Abbruchverfahren dargestellt.

Außerdem wird der Behandlungs- und Transportaufwand beschrieben und die verwendeten Ökobilanz-Datensätze zur Beschreibung von Hintergrundprozessen aufgelistet.

Das bestehende Alt-Modellgebäude im Althanviertel hat einen Bruttorauminhalt (BRI) von rund 132.000 m³ und eine Bruttogeschoßfläche (BGF) von rund 36.000 m². In Abbildung 48 ist das Tragwerk des Altgebäudes dargestellt. Es hat eine Gesamtmasse an Stahlbeton von etwa 42.500 t, wobei 39.600 Tonnen Beton und 1.900 Tonnen Stahl sind. Die spezifische Materialintensität des Tragwerks ergibt sich daher zu 301 kg Beton/m³ BRI und 14,5 kg Stahl/m³ BRI (siehe Tabelle 13). Die Zusammensetzung des Alt-Modellgebäudes vor Entkernung wird bestimmt, indem die Tragwerksdaten mit Literaturdaten zur Zusammensetzung mehrstöckiger Stahlbetonwohnbauten in Wien ergänzt werden, aus denen die jeweiligen Tragwerksanteile herausgerechnet wurden. Die entsprechenden Daten (siehe letzte Spalte in Tabelle 13) beziehen sich auf Wohnbauten auf dem Areal der Seestadt Aspern in Wien, die auch als Grundlage für die Bestimmung der Gebäudezusammensetzung von Wohnbauten nach 1997 in (Kleemann et al. 2018) dienen.



*Abbildung 48: Stahlbetonkonstruktion des entkernten Bestandsgebäudes auf dem Areal des Franz-Josefs-Bahnhofs in Wien
(Foto: Kleemann 2017)*

Im Rahmen von Variante 1 (Entkernung und Weiternutzung des bestehenden Tragwerks) wird in Szenario 1B auch die Wiederverwendung von Bauteilen inkludiert. Als wiederverwendbare Bauprodukte werden in der Fallstudie beispielhaft Fenster, Türen und Holzböden betrachtet. Die spezifischen Materialintensitäten von Holz, Eisen und Aluminium in diesen Produkten lagen bei den Wohnbauten auf dem Areal der Seestadt Aspern in Wien (siehe letzte Spalte in Tabelle 13) bei 2 kg Holz/m³ BRI, 0,03 kg Eisen/m³ BRI und 0,07 kg Aluminium/m³ BRI. Im Rahmen von Szenario 1B wird angenommen, dass diese Bauprodukte vollständig erfasst und einer Wiederverwendung zugeführt werden. Die Gutschriften für die Wiederverwendung werden dann über die Substitution der Materialien in den Primärprodukten errechnet.

Tabelle 13: Spezifische Materialintensitäten des Modellaltgebäudes basierend auf Daten zum Bestandsgebäude (Beton und Stahl im Tragwerk) und Daten zur Zusammensetzung von mehrstöckigen Wohngebäuden mit Stahlbeton-Tragwerk in Wien (vgl. (Kleemann et al. 2018), Wohngebäude ab 1997)

MATERIAL	GEBÄUDE-ZUSAMMENSETZUNG	TRAGWERK (PLANAUSWERTUNG DES BESTANDSGEBÄUDES)	NICHT-TRAGWERK (BASIEREND AUF KLEEMANN ET AL. 2018)
	[kg/BRI]	[kg/BRI]	[kg/BRI]
Mineralisch	334,3		
Beton	301,0	301,0	0,0
Kies/Sand	4,6		4,6
Ziegel	9,2		9,2
Mörtel/Putz	4,7		4,7
Schüttung	2,3		2,3
Schlacke	0,0		0,0
Blähtonziegel	0,0		0,0
Gips	8,9		8,9
Glas	1,2		1,2
Keramik	0,7		0,7
Naturstein	0,0		0,0
Mineralwolle	1,7		1,6
Mineralwollplatten	0,0		0,0
Asbest(zement)	0,0		0,0
Organisch	9,5		
Holz	3,3		3,3
Heraklit	0,1		0,1
Papier/Karton	0,0		0,0
PVC	0,0		0,0
Div. Kunststoffe	1,3		1,3
Teppich	0,0		0,0
Laminat	0,0		0,0
Linoleum	0,0		0,0
Asphalt	1,5		1,5
Bitumen	1,6		1,6
Polystyrol	1,8		1,8
Metalle	15,1		
Eisen/Stahl	14,9	14,5	0,4
Aluminium	0,2		0,2
Kupfer	0,05		0,05
Total	358,9	315,4	43,4

Im Rahmen von Variante 2 (Abbruch des bestehenden Gebäudes und Neubau des Tragwerks) werden auch Szenarien betrachtet, die von einem nicht-baugleichen Neubau des Tragwerks ausgehen. Für diese Szenarien (2AB und 2BB) wird die spezifische Materialintensität des Tragwerks entsprechend der Zusammensetzung der Stahlbetonwohnbauten, die in der Kategorie Gebäudezusammensetzung von Wohnbauten nach 1997 in Kleemann et al. 2018 analysiert wurden, festgelegt. Dementsprechend ergeben sich für die alternative Tragwerksvariante Materialintensitäten von ca. 372 kg Beton/m³ BRI

und ca. 18 kg Stahl/m³ BRI (siehe Tabelle 14). Somit liegt der Beton- und Stahleinsatz pro m³ BRI für das moderne Tragwerk über dem Alt-Tragwerk. Das liegt einerseits an der Geometrie der Referenzbauwerke der Seestadt Aspern (größere Grundflächen, weniger Geschoße, weniger kompaktes Design) und andererseits an den relativ hohen Geschoßen des Altgebäudes, weshalb der Unterschied in den Materialintensitäten bezogen auf Bruttogeschoßfläche zwischen Altbestand und modernem Tragwerk nur 10 % (anstatt über 20 % bezogen auf BRI) betragen würde. Trotzdem wird im Rahmen der Fallstudie der Bruttorauminhalt gewählt. Es ist auch zu betonen, dass die Tragwerkszusammensetzungen als illustrative Beispiele zu verstehen sind. Ein konkretes Neubauprojekt könnte auch mit einem weniger materialintensiven Tragwerk im Vergleich zum Altgebäude ausgestattet sein, was entsprechende Konsequenzen auf die Bewertung und den Vergleich der Szenarien hätte.

Tabelle 14: Spezifische Materialintensitäten des Tragwerks von modernen mehrstöckigen Wohngebäuden mit Stahlbeton-Tragwerk in Wien (basierend auf Kleemann et al. 2018, Wohngebäude ab 1997)

MATERIAL	TRAGWERK (BASIEREND AUF KLEEMANN ET AL. 2018) [kg/BRI]
Beton	371,5
Stahl	17,5

Der Rückbau und Abbruch von Gebäuden kann äußerst unterschiedlich gestaltet werden, da die Heterogenität von Gebäuden sowie variierende Randbedingungen (technisch, organisatorisch, rechtlich) eine allgemeine Beschreibung und Bewertung von Rückbau- und Abbruchverfahren erschweren. Die Angaben zu den Trennschärfen der unterschiedlichen Entkernungs-, Rückbau- und Abbruchverfahren in Tabelle 15 dienen daher als Beispiele, die den Effekt höherer bzw. niedrigerer Sortiertiefen illustrieren sollen. Die Daten beruhen auf einer Studie zur Evaluierung von Verfahren des Gebäudeabbruches in Österreich (Clement et al. 2010), die unterschiedliche Technologien anhand von Kenngrößen miteinander vergleichbar macht. In der Fallstudie wird die schlichte Demolierung des Altgebäudes ohne vorherige (zumindest teilweise) Entkernung nicht betrachtet, da diese nicht mehr den gesetzlichen Vorgaben (z.B. Schadstofferkundung und -entfrachtung, Trennung bestimmter Fraktionen) entspricht und auch keine Erzeugung von qualitativ hochwertigen Sekundärrohstoffen zulässt. Vielmehr wird der mehr oder weniger tiefgehende Rückbau als Standardabbruchmethode betrachtet (siehe ÖNORM (2014)) und die Trennschärfen in Tabelle 15 so gewählt, dass eine plausible Bandbreite aus (Clement et al. 2010) abgedeckt wird. Dementsprechend bewegen sich die Trennschärfen für alle Fraktionen zwischen 30 und 95 %, wobei Kupfer und Glas generell die höchsten Abtrennungsgrade aufweisen. Nicht abgetrennte Materialien werden in den Mischfraktionen „Mineralischer Bauschutt“, „Organische Mischfraktion“, „Mischschrott“ und „Asphaltabbruch“ gesammelt. Die Fraktion Asphaltabbruch entspricht der Asphaltmenge im Gebäude und wird deponiert. Die anfallenden Abfallströme und die unterschiedlichen Behandlungswege sind in Abbildung 49 qualitativ am Beispiel von Szenario 1B für das Vordergrund-System dargestellt.

Tabelle 15: Trennschärfen der unterschiedlichen Entkernungs- bzw. Rückbauvarianten im Rahmen der Szenarien basierend auf Angaben zu selektivem Abbruch, Rückbau und Entkernung in (Clement et al. 2010)

MATERIAL	A: ENTKERNUNG – NIEDRIGE TRENNSCHÄRFE	B: ENTKERNUNG – HOHE TRENNSCHÄRFE & WIEDERVERW.	A: SELEKTIVER ABBRUCH – NIEDRIGE TRENNSCHÄRFE	B: SELEKTIVER ABBRUCH (RÜCKBAU) – HOHE TRENNSCHÄRFE
Betonabbruch	-	-	50 %	80 %
Ziegel	50 %	80 %	50 %	80 %
Keramik	50 %	95 %	30 %	95 %
Eisen	60 %	95 %	60 %	70 %
Aluminium	60 %	95 %	30 %	60 %
Kupfer	80 %	95 %	80 %	95 %
Holz	50 %	95 %	50 %	95 %
Kunststoffe	30 %	60 %	30 %	60 %
Dämmung	60 %	95 %	60 %	95 %
Bitumen	60 %	95 %	60 %	95 %
Glas	80 %	95 %	80 %	95 %

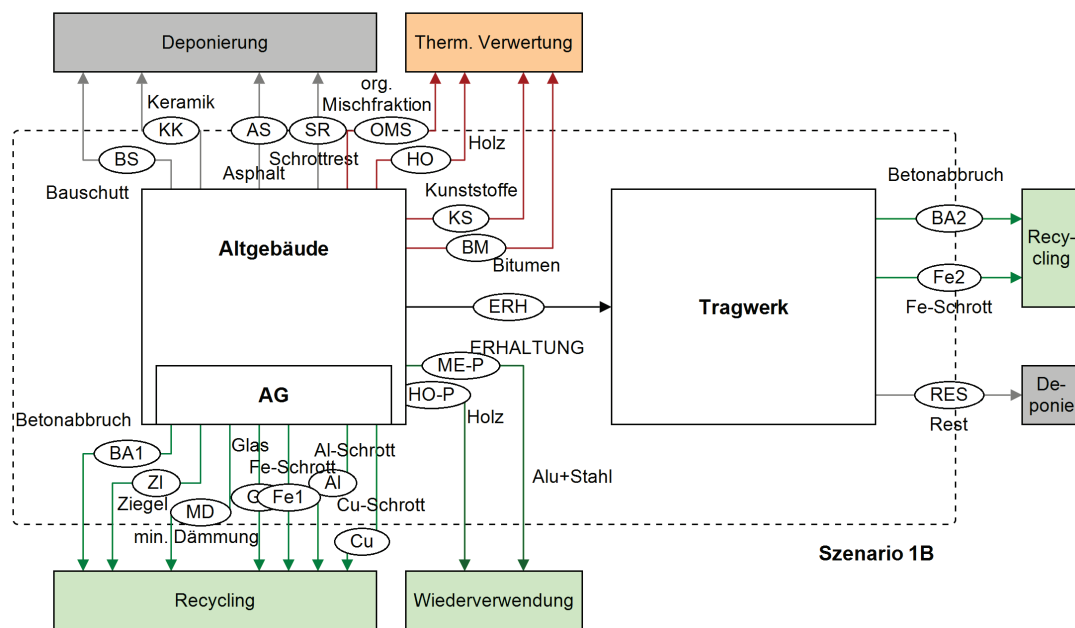


Abbildung 49: Materialflüsse des Vordergrund-Systems im Rahmen von Szenario 1B (Entkernung und Erhaltung des Tragwerkes) inkl. der jeweiligen Verwertungs- und Entsorgungspfade

Die Abfälle aus Bau- und Abbruchtätigkeiten werden zum Großteil außerhalb von Wien einer weiteren Behandlung zugeführt. Die angenommenen Transportdistanzen im Rahmen der Fallstudie sind im Anhang (siehe Kapitel 7.4) angeführt. Wie in Abbildung 49 dargestellt, werden die Abfallströme „Bauschutt“, „Keramik“, „Asphalt“ und „Schrottrest“ (= nicht aussortierter Mischschrott) auf einer Inertabfalldeponie abgelagert. Die Flüsse „organische Mischfraktion“ und „Bitumen“ werden in einer Müllverbrennungsanlage thermisch verwertet, alle anderen Kunststoffabfälle werden als Ersatzbrennstoffe in der Zementindustrie eingesetzt. Alt-Holz wird im Basisfall einem Biomasseheizkraftwerk zugeführt, da aber in der Praxis ein relevanter Anteil auch stofflich in der Plattenindustrie verwertet wird, wird dieser alternative Verwertungspfad im Rahmen der Sensitivitätsanalyse betrachtet. Die Angaben zu Heizwert und klimarelevantem CO₂-Ausstoß der

organischen Materialien sowie zu den thermischen Wirkungsgraden sind im Anhang gelistet (siehe Kapitel 7.4). Zahlreiche Abfälle werden einer stofflichen Verwertung zugeführt. Betonabbruch findet im Straßenbau Anwendung und substituiert dort natürliches Gestein (= Schotter). Ziegel werden zerkleinert und ersetzen im Rahmen der Fallstudie Sand. Es sei erwähnt, dass im Wiener Raum Ziegelmehl auch in großen Mengen als Tonersatz in der Zementindustrie eingesetzt wird, weshalb diese Verwertungsvariante im Rahmen der Sensitivitätsanalyse betrachtet wird. Das gesammelte Glas wird ebenfalls recycelt und zur Erzeugung von Schaumglas eingesetzt. Die getrennt gesammelte mineralische Dämmwolle wird deponiert, da es aus rechtlichen Gründen (gefährlicher Abfall aufgrund lungengängiger Fasern) nicht möglich ist, alte Dämmwolle einer Verwertung oder Wiederverwendung zuzuführen. Die getrennt gesammelten Metallschrotte (Fe, Cu, Al) werden aufgrund ihres Wertes praktisch vollständig der Sekundärproduktion zugeführt. Schließlich werden im Rahmen von Szenario 1B auch ausgewählte Bauteile (Holz-Bodenbeläge, Türen und Fenster) einer Wiederverwertung zugeführt. Dadurch entstehen keine zusätzlichen Emissionen und auch der zusätzliche Energieaufwand wird hier vernachlässigt. Allerdings ist der Arbeitsaufwand der Bauteilwiederverwertung in der Regel hoch (z.B. (Clement et al. 2010, Dechantsreiter et al. 2015)), weshalb dadurch relevante Kosten entstehen (diese werden in der Fallstudie nicht explizit berücksichtigt). Der spezifische Energieaufwand für Abbruch bzw. Entkernung des Altgebäudes wird über einen durchschnittlichen Dieserverbrauch von 61,2 MJ/Mg Material basierend auf (Clement et al. 2010) für das Nicht-Tragwerk abgeschätzt. Aus Mangel an Daten wird für alle Abbruchverfahren der gleiche spezifische Energieverbrauch angenommen. Der Energieverbrauch bzw. die Umweltauswirkungen in Zusammenhang mit dem Abbruch des Tragwerks (Stahlbeton) werden basierend auf den Angaben für Beton aus der ÖKOBAUDAT-Datenbank (BBR 2018) ermittelt.

Die Daten zum Aufwand für die Bereitstellung von Energie und Materialien, den Transport sowie die Behandlung und Verwertung von Abfällen werden anhand von Ökobilanz-Datenbanken ermittelt. In erster Linie wird dazu die Datenbank ecoinvent v3.3 (Ecoinvent Association 2017) verwendet. Außerdem werden die Daten zu Beton als Durchschnitt über die Festigkeitsklassen C20/25, C25/30, C30/37 und C35/45 aus der ÖKOBAUDAT-Datenbank (BBR 2018) ermittelt. Eine Aufstellung zu den verwendeten Datenbankprozessen und den jeweiligen Quellen findet sich in Kapitel 7.4.

Die Verwertung und Wiederverwendung von Baumaterialien wird anhand von Gutschriften in der Ökobilanz berücksichtigt. Für jedes Sekundärprodukt wird ein entsprechendes Primärprodukt bestimmt, dessen Erzeugung durch die Bereitstellung des Sekundärproduktes vermieden wird. Anhand eines Substitutionsfaktors wird die funktionale Äquivalenz zwischen Sekundär- und Primärprodukt abgebildet. Im Rahmen der Szenarien wird für alle Sekundärprodukte von vollständiger Äquivalenz (Substitutionsfaktor = 1) ausgegangen, so ersetzen beispielweise Strom und Wärme aus einer Müllverbrennungsanlage in gleichem Ausmaß (energiebezogen) Strom und Wärme der marginalen Strom- und Wärmeproduktionstechnologien. In Österreich sind dies Strom erzeugt aus Steinkohle und Wärme aus Erdgas (Van Eygen et al. unter Begutachtung). Eine Aufstellung der verwendeten Sekundär- und Primärproduktionsprozesse im Zuge der Ökobilanz findet sich in Kapitel 7.4.

Wirkungsabschätzung

Im Rahmen der Wirkungsabschätzung werden die Auswirkungen der Energie- und Materialflüsse in Zusammenhang mit den Bewirtschaftungsszenarien auf Ressourcen und Umwelt bewertet. Als Wirkungskategorien werden globale Erwärmung (Treibhauspotential über 100 Jahre), der kumulierte Primärenergieaufwand und der abiotische Ressourcenverbrauch ausgewählt. Das Treibhauspotential

bezieht sich auf einen Umwelteffekt von besonderer gesellschaftlicher Relevanz (Klimawandel) und der kumulierte Primärenergieaufwand sowie der abiotische Ressourcenverbrauch beziehen sich auf die effiziente Nutzung von Ressourcen.

Globale Erwärmung wird anhand des Treibhauspotentials, welches den Strahlungsantrieb eines Stoffes über einen bestimmten Zeithorizont relativ zu CO₂ ausdrückt, bewertet. Im Rahmen dieser Studie wird das Treibhauspotential über 100 Jahre entsprechend der Charakterisierungsfaktoren des letzten IPCC-Berichts (IPCC 2013) verwendet. CO₂-Emissionen biogenen Ursprungs werden als klimaneutral bewertet und mit einem Charakterisierungsfaktor (CF) von 0 belegt. Methanemissionen biogenen Ursprungs werden beispielsweise mit einem Charakterisierungsfaktor von 28,5 berücksichtigt oder Lachgasemissionen (N₂O) mit einem Faktor von 265. Der kumulierte Energieaufwand (KEA) stellt die Summe der Aufwendungen an Primärenergie (= Energie vor der ersten Umwandlung) dar, die für die Bereitstellung eines bestimmten Produktes oder einer Leistung notwendig sind (VDI 2012). Im Rahmen der Studie wird die Implementierung der Ecoinvent-Datenbank zur Berechnung der Charakterisierungsfaktoren verwendet (Hischier et al. 2010), wobei nur der Primäraufwand aus nicht erneuerbaren Quellen (fossil, nuklear, Primärwald) berücksichtigt wird. Die Einheit dieser Wirkungskategorie ist MJ Primärenergie. Der Verbrauch an abiotischen Ressourcen wird anhand des Ressourcenabbaupotentials nach CML 2001 bewertet. Darin wird der Verbrauch an mineralischen, metallischen und fossilen Rohstoffen basierend auf den vorhandenen geogenen Reserven bewertet (Hischier et al. 2010). Der Ressourcenverbrauch wird relativ zu Antimon ausgedrückt, weshalb die Einheit der Wirkungskategorie kg Sb-Äquivalente ist.

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse in den einzelnen Wirkungskategorien zu ermöglichen, wird abschließend eine Normalisierung durchgeführt. Für jede Wirkungskategorie wird eine Referenzgröße bestimmt, durch die das jeweilige Ergebnis dividiert wird. In dieser Studie werden die jeweiligen Auswirkungen eines durchschnittlichen Erdbewohners (globaler Durchschnitt) als Bezugsgröße verwendet (Laurent et al. 2013). Für das Treibhauspotential sind das 8.100 kg CO₂-Ä/Person und Jahr, für den kumulierten Energieverbrauch sind das 75 GJ Primärenergie/Person und Jahr und für den abiotischen Ressourcenverbrauch sind das 26,7 kg Sb-Ä/Person und Jahr.

Kritische Analyse und Diskussion

Die kritische Analyse der verwendeten Daten und der Annahmen in der Bewertung sowie die Diskussion der Ergebnisse in Hinblick auf Datengrundlage und Berechnungsmethoden stellen einen wichtigen Teil einer Ökobilanz gemäß (ISO 14040 2006) dar. Daher werden im Rahmen der Fallstudie Sensitivitätsanalysen durchgeführt, die den Effekt der Variation bestimmter Faktoren auf die Ergebnisse untersuchen. Einerseits wird der Effekt alternativer Verwertungspfade für ausgewählte Abfallströme (Altholz zur Plattenindustrie anstatt zum Biomasse-Heizkraftwerk und Ziegelabbruch als Tonersatz in der Zementindustrie anstatt als Sandersatz) auf die jeweiligen Ergebnisse der Bewirtschaftungsszenarien untersucht. Andererseits wird der Einfluss einer Variation der Eingangsparameter (z.B. Gebäudezusammensetzung, Trennschärfen, Wirkungsgrade, Substitutionsfaktoren, Transportdistanzen, Indikatorwerte der Datenbankprozesse usw.) auf die Szenarien-Ergebnisse anhand von Monte Carlo Simulationen und Regressionsanalysen untersucht. Dazu werden alle Parameter als normalverteilte Zufallsvariablen angenommen und durch Mittelwert und relative Standardabweichung definiert. Es wird für alle Parameter eine relative Standardabweichung von 10 % angesetzt. Im Zuge der Sensitivitätsanalyse werden somit nicht die tatsächlichen Schwankungsbreiten der Parameter abgebildet, sondern es wird betrachtet, welchen

Effekt eine Variation der Parameterwerte in einem bestimmten Ausmaß auf die Ergebnisse hat. Auf diese Weise werden kritische Parameter, deren Variation einen besonders starken Einfluss auf das Ergebnis hat, für die jeweiligen Bewirtschaftungsszenarien identifiziert. Die Simulationsrechnungen werden anhand der Software @Risk (Palisade Corporation 2016) in MS Excel durchgeführt.

3.2.3.3 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Materialflüsse der unterschiedlichen Szenarien zur Bewirtschaftung des Modellaltgebäudes präsentiert und in Hinblick auf Umweltauswirkungen (Beitrag zur globalen Erwärmung) und Ressourcenschonung (kumulierter Energieverbrauch und abiotisches Ressourcenabbaupotential) bewertet. Die Ergebnisse der Bewertung werden analysiert und in Bezug auf maßgebliche Einflussfaktoren diskutiert.

Materialflüsse der verschiedenen Bewirtschaftungsszenarien

Die Materialbilanzen der Bewirtschaftungsszenarien wurden mit der Materialflussanalysesoftware STAN (www.stan2web.net) erstellt und zeigen den Materialbestand im Altgebäude (ca. 47.000 Tonnen) sowie die Flüsse an Abfällen und Baumaterialien im Rahmen der Szenarien (siehe Abbildung 50 - Abbildung 55).

In Variante 1 (Szenario 1A und 1B) bleibt das Tragwerk des Modell-Altgebäudes erhalten und Materialflüsse entstehen in Zusammenhang mit der Entkernung des Altgebäudes sowie dem Abbruch des Tragwerkes am Ende der Nutzungsdauer. Während im Rahmen von Szenario 1A keine Bauteilwiederverwendung stattfindet (siehe Abbildung 50), wird im Rahmen von Szenario 1B angenommen, dass Holzfußböden, -türen und -fenster ausgebaut und wiederverwendet werden (siehe Abbildung 51). Dadurch werden in Szenario 1B 260 Tonnen Holz, 9 Tonnen Aluminium und 4 Tonnen Eisen in Produkten wiederverwendet. Insgesamt werden in den Szenarien 1A und 1B während der Entkernung ca. 5.700 Tonnen an Material mobilisiert. Aufgrund der höheren Sortiertiefe ist der Anteil an Materialien zur stofflichen Verwertung in Szenario 1B um etwa 50 % höher als in Szenario 1A. Am Ende der Nutzung wird schließlich auch das Tragwerk aus Stahlbeton abgebrochen und praktisch vollständig recycelt (Betonabbruch und Stahlschrott).

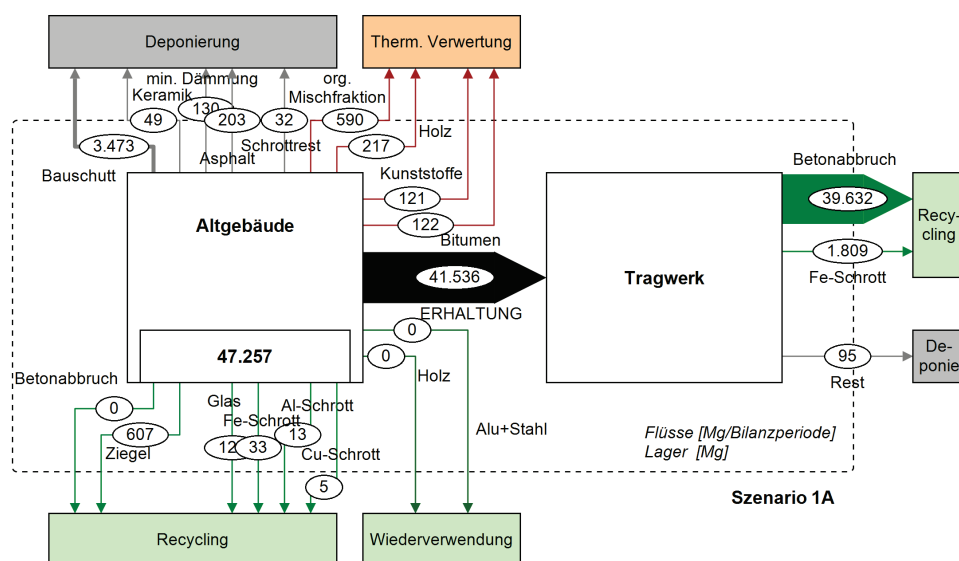


Abbildung 50: Materialbilanz in Tonnen für Szenario 1A: Entkernung mit niedriger Trennschärfe und Erhaltung des Tragwerks

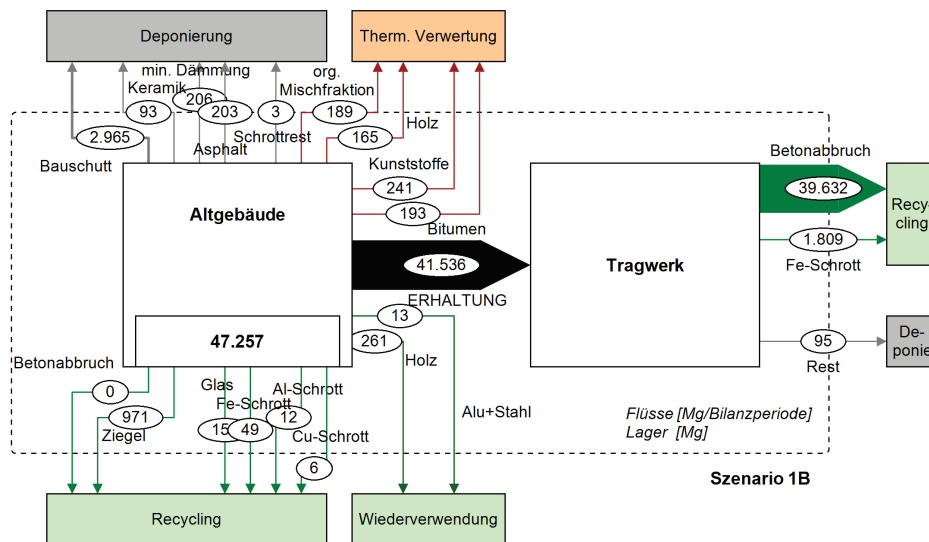


Abbildung 51: Materialbilanz in Tonnen für Szenario 1B: Entkernung mit hoher Trennschärfe und Erhaltung des Tragwerks

In Variante 2 (Szenarien 2AA, 2AB, 2BA und 2BB) wird auch das Tragwerk des Modell-Altgebäudes abgebrochen und einer Verwertung zugeführt (siehe Abbildung 52- Abbildung 55). Zur Gewährleistung von Nutzengleichheit zwischen den Szenarien wird anschließend ein Stahlbetontragwerk mit dem gleichen Bruttorauminhalt baugleich (2AA und 2BA) bzw. entsprechend moderner Wohnbauprojekte in Wien (2AB und 2BB) errichtet. Dementsprechend wird der gesamte Materialbestand des Altgebäudes mobilisiert und einer Verwertung oder Entsorgung zugeführt. Die Errichtung des neuen Tragwerkes geht mit einem Materialbedarf (Beton und Stahl) von ca. 42.000 Tonnen (baugleich) bzw. ca. 51.000 Tonnen (modern) einher. Diese Materialien werden wiederum am Ende der Lebensdauer fast vollständig recycelt.

In den Szenarien mit niedriger Trennschärfe beim Abbruch des Altgebäudes (2AA und 2AB) werden ca. 22.000 Tonnen an Material stofflich verwertet (46 % des Materialbestandes), 1.000 Tonnen thermisch verwertet und 24.000 Tonnen deponiert (vgl. Abbildung 52 und Abbildung 53). Die größten Flüsse stellen mit Abstand mineralischer Bauschutt und Betonabbruch dar. Das Material für das neu errichtete Tragwerk wird im Szenario als Materialimport berücksichtigt und fällt am Ende der Lebensdauer vorwiegend als Betonabbruch, Stahl-Schrott und einem kleinen Rest zur Deponierung an.

In den Szenarien mit hoher Trennschärfe beim Abbruch des Altgebäudes (2BA und 2BB) werden etwa 34.000 Tonnen stofflich verwertet (73 % des Materialbestandes), 1.000 Tonnen thermisch verwertet und 12.000 Tonnen deponiert (vgl. Abbildung 54 und Abbildung 55). Dementsprechend ist der Deponieanteil in den Szenarien 2BA und 2BB (ca. 25 %) nur halb so groß, wie beim Abbruch mit niedriger Trennschärfe in den Szenarien 2AA und 2AB (ca. 50 %).

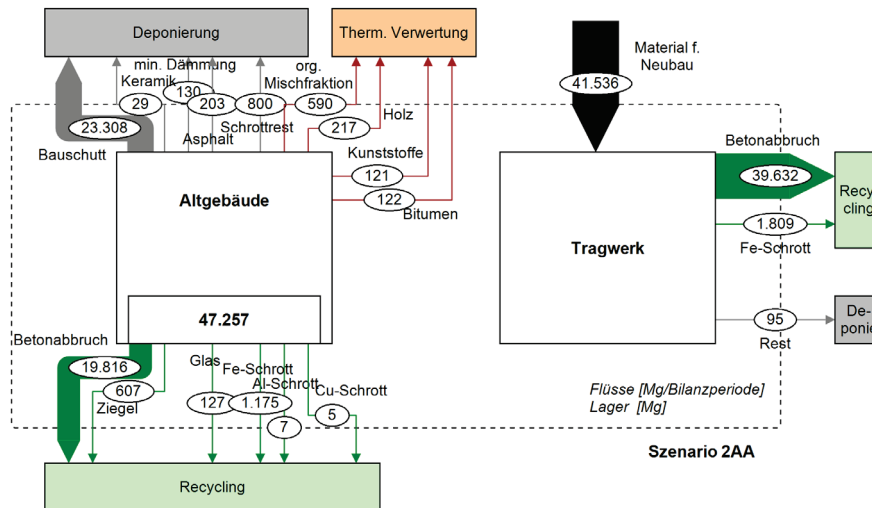


Abbildung 52: Materialbilanz in Tonnen für Szenario 2AA: Abbruch mit niedriger Trennschärfe und Neubau eines identischen Tragwerks

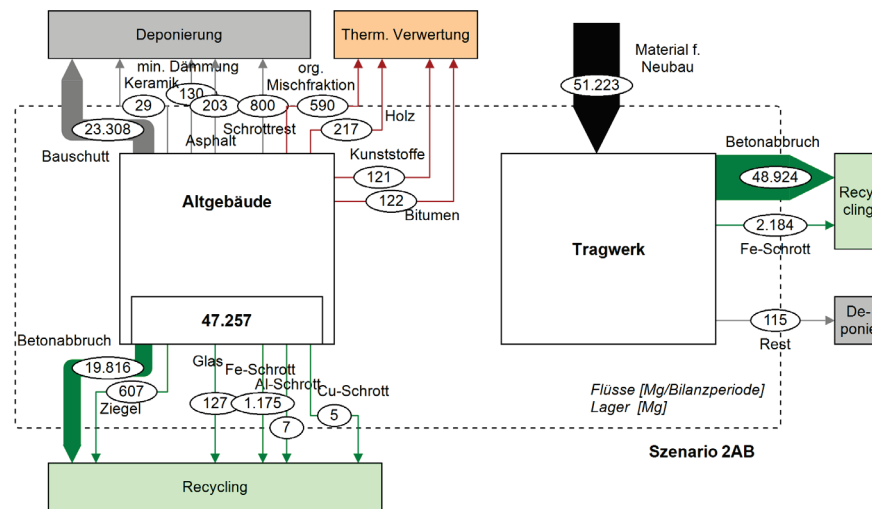


Abbildung 53: Materialbilanz in Tonnen für Szenario 2AB: Abbruch mit niedriger Trennschärfe und moderner Neubau des Tragwerks

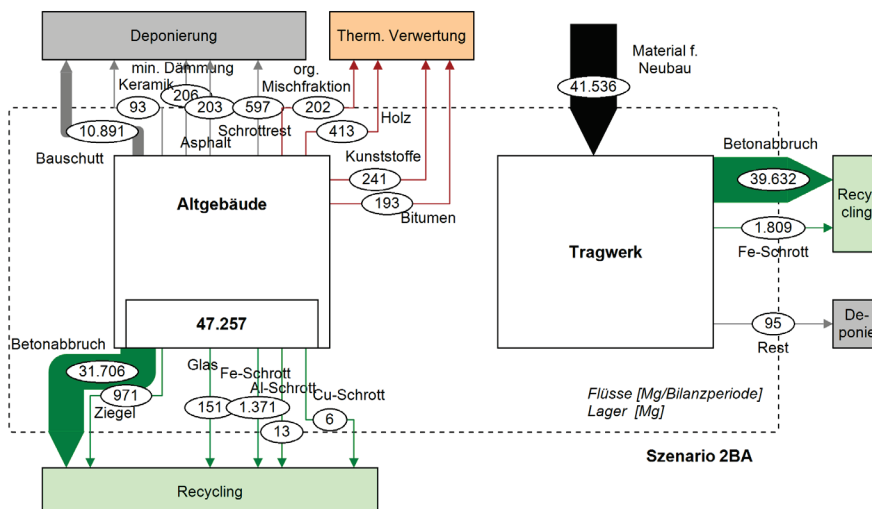


Abbildung 54: Materialbilanz in Tonnen für Szenario 2BA: Rückbau mit hoher Trennschärfe und Neubau eines identischen Tragwerks

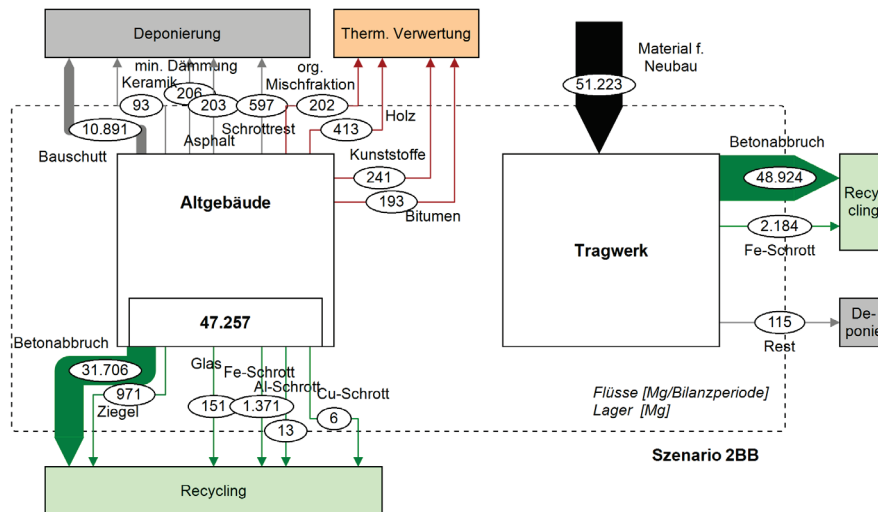


Abbildung 55: Materialbilanz in Tonnen für Szenario 2BB: Rückbau mit hoher Trennschärfe und Neubau eines modernen Tragwerks

Die Aufwendungen in Form von Materialien und Energie für die unterschiedlichen Abbruch-, Transport- und Behandlungsprozesse werden in den Szenarien genauso berücksichtigt, wie der Nutzen durch die Bereitstellung von Sekundärprodukten. In Abbildung 56 sind beispielhaft die Aufwendungen bzw. Gutschriften an CO₂-Äquivalenten (Beitrag zur globalen Erwärmung) für die Nutzung von einer Tonne Stahlbeton (STB) im Tragwerk dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass vor allem die Produktion der Baumaterialien (Beton und Stahl) eine starke Belastung für das Klima darstellt (220 kg CO₂-Ä/Mg STB), wohingegen Transport, Einbau und Abbruch des Stahlbetons kaum eine Rolle über den Lebenszyklus spielen. Einen wesentlichen Beitrag leistet schließlich die Aufbereitung und das Recycling am Lebensende, wodurch Einsparungen (negativ) von -130 kg CO₂-Ä/Mg STB erzielt werden. Insgesamt trägt die Nutzung von einer Tonne Stahlbeton im Tragwerk netto (Bilanz aus Belastungen und Gutschriften) mit 118 kg CO₂-Ä zur globalen Erwärmung bei.

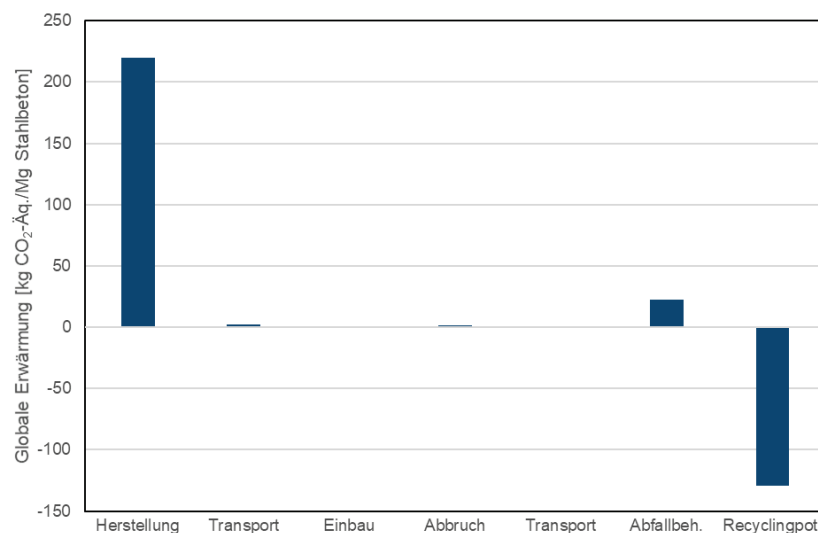


Abbildung 56: Beitrag zur globalen Erwärmung durch die Nutzung von einer Tonne Stahlbeton für die einzelnen Lebenszyklusphasen eines Gebäudes (Daten aus (BBR 2018) und (Ecoinvent Association 2017))

Ressourcenschonung und Umweltauswirkungen der Szenarien

Die unterschiedlichen Bewirtschaftungsszenarien wurden hinsichtlich ihres Beitrages zur globalen Erwärmung (Abbildung 57), ihres Beitrages zum Abbau abiotischer Ressourcen (Abbildung 58) und

ihres Verbrauches an Primärenergie aus nicht erneuerbaren Quellen (Abbildung 59) bewertet. Die Ergebnisse werden nachfolgend für jede Wirkungskategorie getrennt analysiert.

In Abbildung 57 ist der Beitrag der Szenarien zur globalen Erwärmung ausgedrückt in 1.000 Tonnen CO₂-Ä aufgegliedert nach unterschiedlichen Prozessen dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Szenarien, bei denen das Alt-Tragwerk weiter genutzt wird, am besten abschneiden und in Netto-Einsparungen von -5.500 Gg CO₂-Ä (Szenario 1A) bzw. -6.000 Gg CO₂-Ä (Szenario 1B) resultieren. Das ist der Fall, da das Altgebäude ohne Belastungen angenommen wird und sich somit durch die Verwertung der Materialien größere Einsparungen ergeben, als Belastungen durch den Aufwand für die Behandlung, den Transport und die Entsorgung entstehen. Die größte Einsparung ergibt sich durch die Verwertung des bestehenden Tragwerks (Stahl und Beton) am Ende der Nutzung (ca. 80 % der gesamten Einsparungen in 1A und 1B). Wesentliche Einsparungen durch die Entkernung stellen die thermische Verwertung der organischen Materialien und die stoffliche Verwertung der Metalle und auch der mineralischen Baustoffe dar. In Szenario 1B leistet die Wiederverwendung der Bauprodukte den zweitgrößten Beitrag zu den Einsparungen (ca. 9 %). Die größten Belastungen der Variante 1 sind verbunden mit der Aufbereitung und dem Recycling der Abfälle des Tragwerksabbruchs (ca. 82 %), der Entkernung des Altgebäudes (knapp 10 %), dem Abbruch des Tragwerks (knapp 5 %) und dem Transport (etwa 3 %).

Die Szenarien der Variante 2 (Abbruch und Neuerrichtung des Tragwerks) resultieren im Gegensatz zu Variante 1 in Netto-Belastungen zwischen 550 (Szenario 2BA) und 2.500 Gg CO₂-Ä (Szenario 2AB), wobei die Szenarien mit baugleichem Tragwerk besser abschneiden, als die Szenarien mit modernem Tragwerk (vgl. Abbildung 57). Die größten Belastungen sind generell mit der Errichtung des Tragwerks verbunden (über 85 %) gefolgt von der Aufbereitung und dem Recycling der Abfälle aus dem Tragwerksabbruch (ca. 9 %), dem Abbruch des Altgebäudes (1-2 %), dem Transport (1-2 %), dem Abbruch des Tragwerks (0,5 %) und dem eigentlichen Bau des Tragwerks (0,2 %). Die größten Einsparungen ergeben sich wieder durch die Verwertung des Tragwerks (Stahl und Beton) am Ende der Nutzung (ca. 60 %) und durch die stoffliche Verwertung der Metalle (ca. 30 %) im Zuge des Abbruchs des Altgebäudes. Die thermische Verwertung der organischen Materialien trägt ca. 7 % zu den Einsparungen bei.

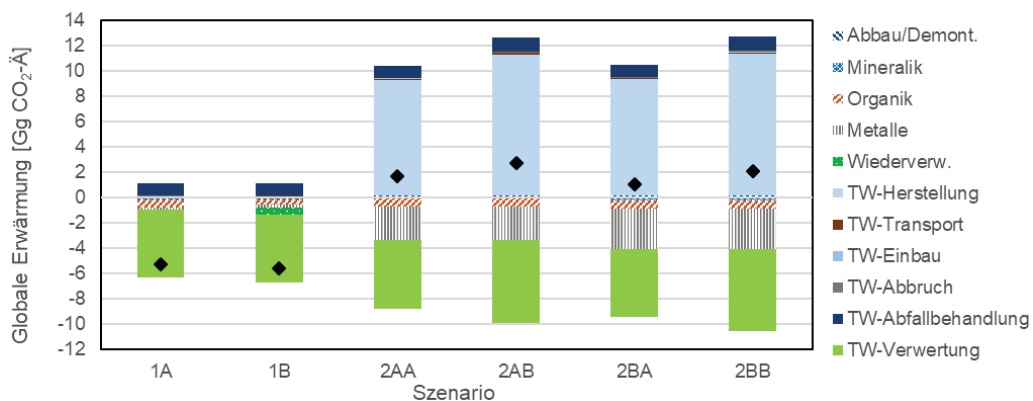


Abbildung 57: Beitrag der Szenarien zur globalen Erwärmung (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)

In Hinblick auf den Abbau abiotischer Ressourcen (Abbildung 58) wird durch alle Szenarien eine Netto-Einsparung erzielt. Die größten Netto-Einsparungen erzielen wiederum die Szenarien der Variante 1 mit -30 (1A) bzw. -33 Tonnen Sb-Ä. Die größten Beiträge zu den Einsparungen leisten das Recycling von Stahl und Beton aus dem Tragwerksabbruch, die thermische Verwertung der org. Abfälle (durch die

Substitution fossiler Energieträger) sowie in Szenario 1B die Bauteilwiederverwendung. Obwohl die wiederverwendeten Bauteile massenmäßig nur knapp 5 % der anfallenden Mengen durch die Entkernung in Szenario 1B ausmachen, machen sie 20 % der Einsparung aus die durch die Nutzung der Materialien aus der Entkernung erzielt wird. Die Szenarien der Variante 2 (Abbruch und Neu-Errichtung des Tragwerks) resultieren in Netto-Einsparungen von -13,6 (2AB) bis -17,1 (2BA) Tonnen Sb-Ä. Die wichtigsten Einsparungen werden wieder durch das Recycling der Tragwerksmaterialien (ca. 50 %), die thermische Verwertung der org. Abfälle (ca. 30 %) und das Recycling der Metalle im Altgebäude (ca. 20 %) erzielt. Die größten Belastungen werden durch die Neu-Errichtung des Tragwerks (ca. 70 %), die Aufbereitung und das Recycling der Tragwerksmaterialien (Stahl und Beton) am Ende der Lebensdauer (ca. 20 %) und die Verwertung/Entsorgung der mineralischen Abfälle aus dem Abbruch des Altgebäudes verursacht.

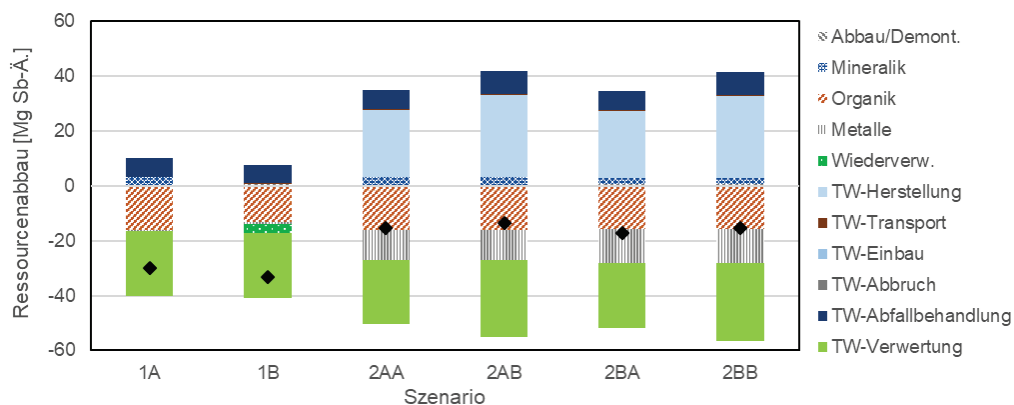


Abbildung 58: Beitrag der Szenarien zum Abbau abiotischer Ressourcen (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)

Der kumulierte Verbrauch an Primärenergie durch die Bewirtschaftungsszenarien (inkl. der jeweiligen Beiträge wesentlicher Prozesse) ist in Abbildung 59 dargestellt. Auch hier schneiden die Szenarien der Variante 1 mit Netto-Einsparungen von -62 (1A) bzw. -67 (1B) TJ Primärenergieaufwand am besten ab. Während die Belastungen durch die Entkernung und den Abbruch sowie die Behandlung und Verwertung der Abfälle gering sind, ergeben sich hohe Einsparungen durch die Substitution von Rohstoffen und Energieträgern infolge der stofflichen und thermischen Verwertung. Die Szenarien der Variante 2 erzielen wesentlich niedrigere Netto-Einsparungen zwischen -5 (2AB) und -19 (2BA) TJ Primärenergieaufwand. Vor allem die Neu-Errichtung des Tragwerks und die Aufwendungen für die Aufbereitung und Verwertung der Abfälle kompensieren den Großteil der Einsparungen durch die Substitution von Rohstoffen und Energieträgern. Dementsprechend schneidet das Szenario BA der Variante 2 am besten ab, da es das weniger materialintensive Tragwerk und die höchste Sortiertiefe beim Abbruch des Altgebäudes aufweist.

Aus den Ergebnissen für die verschiedenen Wirkungskategorien wird deutlich, dass die Weiternutzung des bestehenden Tragwerks (Variante 1) sowohl aus Umwelt als auch aus Ressourcensicht gegenüber dem Abbruch und Neubau zu bevorzugen ist. Dieser Vorteil ist umso ausgeprägter, je höher die Trenntiefe bei der Entkernung im Vergleich zum Abbruch des Altgebäudes ist. Dementsprechend stellt Szenario 1B für jede der drei Wirkungskategorien das beste Szenario dar und Szenario 2AB das schlechteste (vgl. Abbildung 60).

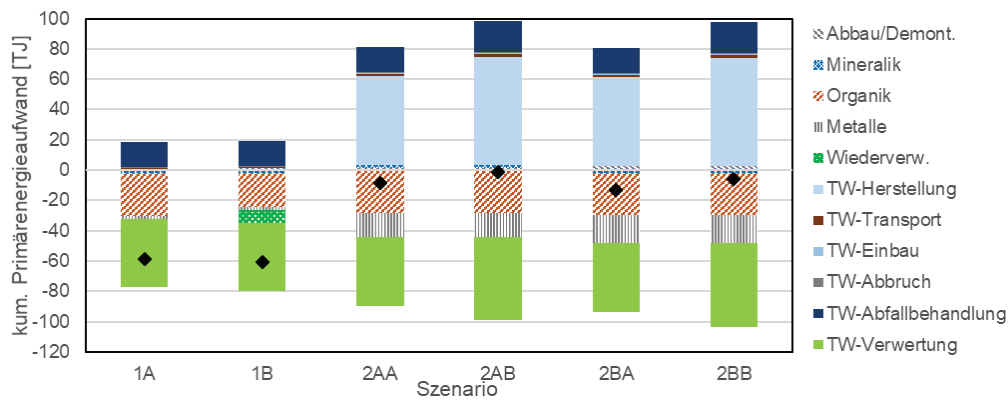


Abbildung 59: Kumulierter Primärenergiebedarf der Bewirtschaftungsszenarien (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)

Um die Größe der Beiträge der Szenarien zu den Wirkungskategorien zu vergleichen, werden die Einwirkungen in Abbildung 60 in normalisierter Form als Personenäquivalente dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Szenarien generell die größten Beiträge in Bezug auf das abiotische Ressourcenabbaupotential leisten, da hier die Netto-Einsparungen zwischen -1.240 und -510 Personenäquivalente betragen. Das ist insofern gut nachvollziehbar, da Bauwerke äußerst materialintensiv sind und somit ein relevantes Rohstoffpotential in Gebäuden vorhanden ist. Wenn dieses Potential ausgeschöpft wird, kann die Bewirtschaftung von Alt-Gebäuden einen maßgeblichen Beitrag zur Schonung abiotischer Ressourcen leisten.

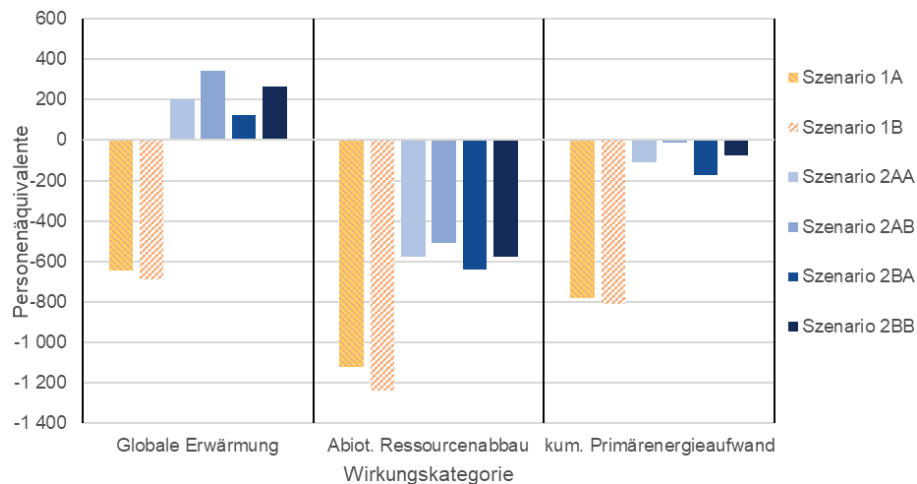


Abbildung 60: Vergleich der Szenario-Ergebnisse für die unterschiedlichen Wirkungskategorien ausgedrückt in Personenäquivalenten (=entspricht dem Ressourcenverbrauch bzw. der Umweltbelastung einer durchschnittlichen globalen Person)

Um die Effekte der Szenarien auf Umwelt und Ressourcen besser zu illustrieren, werden die Ergebnisse auf die Anzahl von Wohnungen im Gebäude nach der Umnutzung bezogen: 270 Wohnungen. Demnach können pro Wohnung bei optimaler Bewirtschaftung des Altgebäudes (Szenario 1B) die jährlichen Treibhausgasemissionen von 2,7 Personen, der jährliche abiotische Ressourcenverbrauch von 4,6 Personen sowie der jährliche Primärenergieverbrauch von 3,3 Personen eingespart werden. Das ungünstigste Szenario (2AB) erzielt dagegen Einsparungen von 0,2 (jährl. Primärenergieaufwand) bzw. 1,9 (jährl. abiot. Ressourcenverbrauch) Personen und eine zusätzliche Belastung von 0,7-mal des jährlichen Ausstoßes an Treibhausgasen einer Person. Daraus ist ersichtlich, dass die Art der Bewirtschaftung des Modell-Altgebäudes in etwa einen Einfluss auf Ressourcen- und Umweltschonung

im Ausmaß des jährlichen Ressourcenverbrauchs bzw. der jährlichen Umweltbelastung der Bewohner hat (bei angenommenen Haushaltsgrößen von 2-3 Personen). Das optimale Szenario (1B) kann also im Vergleich zu den Szenarien 2AB oder 2BB den Ressourcenverbrauch und die Umweltbelastungen durch die Bewohner für ein Jahr kompensieren.

Limitationen und Sensitivitätsanalysen

Im Rahmen der Szenarien waren zahlreiche Annahmen notwendig, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Die Zusammensetzung des Altgebäudes ist modellhaft zu sehen, da nur für das bestehende Tragwerk Primärdaten verfügbar waren und die Materialintensitäten des Nicht-Tragwerkes anhand von Literaturdaten für Wohnbauten mit Stahlbetontragwerk nach 1997 in Wien abgeschätzt wurden. Je nach tatsächlicher Zusammensetzung des Altgebäudes könnte sich durch die Entkernung ein größerer oder kleinerer Nutzen im Rahmen der Szenarien ergeben. Außerdem ist hinsichtlich der Materialintensität des neuen Tragwerkes festzuhalten, dass diese in einem konkreten Fall auch niedriger sein könnte, als die des Bestandstragwerkes, wodurch die Szenarien 2AB und 2BB jeweils besser abschneiden würden, als 2AA und 2BA. Da die Szenarien der Variante 1 jedoch für alle Wirkungskategorien mindestens doppelt so hohe Einsparungen erzielen als die Szenarien der Variante 2, ist auch bei einer niedrigeren Materialintensität des Stahlbetontragwerkes nicht von einer geänderten Tendenz in Bezug auf die Varianten auszugehen (1 bleibt besser als 2). Das könnte sich allerdings ändern, wenn das Stahlbetontragwerk durch ein Tragwerk aus einem anderen Material ersetzt wird.

Eine weitere Einschränkung der Fallstudie stellt die schlechte Datenlage zur Abschätzung der Material- und Energieaufwendungen für Entkernung und Abbruch dar. Ganz besonders in Hinblick auf unterschiedliche Abbruchverfahren und Sortiertiefen. In der gegenständlichen Studie wurden allgemeine Durchschnittswerte verwendet, die nicht zwischen den jeweiligen Technologien bzw. Verfahren unterscheiden. Das erscheint gerechtfertigt, da der tatsächliche Aufwand oft sehr fallspezifisch ist und von zahlreichen Faktoren (z.B. Lage, Zeitplan, Platzangebot, Gebäudezusammensetzung, Gebäudestruktur, usw.) abhängt. Nichtsdestotrotz werden im Rahmen der Studie verfahrensspezifische Aufwendungen vernachlässigt, was tendenziell zu einer besseren Bewertung von Verfahren mit höherer Trennschärfe führt. Da der Aufwand für Entkernung und Abbruch in allen Szenarien einen relativ kleinen Beitrag zu den Ergebnissen leistet, ist jedoch durch diese Vereinfachung keine grundsätzliche Änderung der Szenarien-Reihenfolge zu erwarten.

Schließlich werden im Rahmen der Fallstudie nur drei Wirkungskategorien betrachtet, obwohl viele weitere für eine umfassende ökologische Bewertung der Szenarien zur Verfügung stehen würden. Die Auswahl der Wirkungskategorien erfolgte vor dem Hintergrund Ressourcen- und Energieeinsparungseffekte durch Urban Mining zu quantifizieren und beinhaltet deshalb nur die globale Erwärmung als Umwelteffekt. Aussagen in Bezug auf Toxizität oder andere Umwelteffekte sind anhand der durchgeführten Berechnung nicht beabsichtigt und sinnvoll.

Im ersten Teil der Sensitivitätsanalyse wurde der Effekt alternativer Verwertungspfade für die zwei Abfallströme Altholz und Ziegelabbruch auf die Szenarien-Ergebnisse untersucht. Es zeigte sich, dass Altholzrecycling in der Plattenindustrie generell zu größeren Einsparungen führt, als die Basisvariante einer direkten Verbrennung im Biomasse-Heizkraftwerk, sofern die Spanplatte am Lebensende thermisch verwertet wird (Einsparungen im Bereich von 1-5 % der Werte der Basisszenarien). Die Nutzung von Ziegelmehl als Tonersatz in der Zementindustrie weist dagegen keinen Vorteil gegenüber der Substitution von Sand auf, die Ergebnisse sind im Vergleich zu den Basisszenarien sogar um 0-2 %

höher. Obwohl die beiden betrachteten Alternativen einen relativ geringen Einfluss auf die Ergebnisse haben, ist die Substitution oft maßgeblich für ein Szenarien-Ergebnis (Laurent et al. 2014). Dementsprechend ist es im konkreten Fall eines Altgebäudes besonders wichtig, die Verwertungspfade (stofflich und thermisch) so zu gestalten, dass eine möglichst hochwertige Nutzung der Sekundärrohstoffe gewährleistet ist.

Der zweite Teil der Sensitivitätsanalyse untersuchte den Einfluss einer Variation der Eingangsparameter (z.B. Materialintensitäten, Trennschärfen, Transportdistanzen, Material- und Energieaufwendungen, Emissionen der Ökobilanzdatensätze, Heizwerte, Wirkungsgrade, Substitutionsfaktoren usw.) auf die Szenarien-Ergebnisse. In Tabelle 16 sind die 10 kritischsten Parameter beispielhaft für den Beitrag zur globalen Erwärmung und die Szenarien 1A und 2AA dargestellt. Den größten Einfluss auf das Ergebnis von Szenario 1A haben die Treibhausgasemissionen der substituierten Primärstahl- und Stromproduktion mit Regressionskoeffizienten von -0,92 und -0,18 (je höher die Treibhausgasemissionen der Prozesse, desto niedriger der Beitrag zur globalen Erwärmung durch das Szenario). Außerdem reagieren die Ergebnisse empfindlich auf die Substitution von Fernwärme (5. Platz) und Substitutionseffekte durch Betonrecyclingmaterial (8. Platz). Kritisch sind auch die Wirkungsgrade der Müllverbrennungsanlage für Strom (3. Platz) und Wärme (7. Platz). Die Emissionen in Zusammenhang mit der Sekundärstahlproduktion (4. Platz) haben ebenfalls einen relevanten Einfluss auf das Ergebnis, genauso wie die Heizwerte von Kohle (wird durch die Mitverbrennung organischer Abfälle in der Zementindustrie ersetzt) und Holz. Schließlich beeinflusst auch der Holzanteil im Gebäude das Ergebnis (10. Platz), da der Beitrag zur globalen Erwärmung niedriger ist, wenn der Holzanteil höher ist. In Hinblick auf das Ergebnis von Szenario 2AA haben die Treibhausgasemissionen der Betonproduktion für das neue Tragwerk den größten Einfluss auf das Ergebnis (je höher, desto höher ist auch der Beitrag des Szenarios zur globalen Erwärmung). Auch für Szenario 2AA stellt das Stahlrecycling einen kritischen Faktor dar, da der Stahlsubstitutionsfaktor, die substituierte Primärstahlproduktion, die Trennschärfe für Eisen/Stahl, der Stahlanteil am Gebäude und die Sekundärstahlproduktion die Plätze 2 - 6 der kritischen Parameter einnehmen. Daneben sind auch die Parameter in Zusammenhang mit der thermischen Verwertung von großer Bedeutung, was sich an der Reihung des Wirkungsgrades der Müllverbrennung für Strom (7. Platz), der substituierten Stromproduktion (8. Platz) und der substituierten Fernwärmeproduktion (10. Platz) erkennen lässt. Außerdem findet sich hier der Nutzen durch das Betonrecycling (Einsparung an Treibhausgasen) auf Platz 9 der kritischen Parameter.

Tabelle 16: Kritische Parameter für den Beitrag zur globalen Erwärmung der Szenarien 1A und 2AA aufgrund der Sensitivitätsanalyse (Monte Carlo Simulation und Regressionsanalyse zur Analyse des Beitrages einer Parametervariation zum Ergebnis)

SZENARIO 1A		SZENARIO 2AA	
Parameter	Koeffizient	Parameter	Koeffizient
Primärstahlproduktion (substituiert)	-0,92	Betonherstellung (Tragwerk)	0,53
Stromproduktion (substituiert)	-0,18	Stahl-Substitutionsfaktor	-0,44
Wirkungsgrad Müllverbrennung – Strom	-0,18	Primärstahlproduktion (substituiert)	-0,40
Sekundärstahlproduktion (Aufwand)	0,17	Trennschärfe – Eisen/Stahl	-0,36
Fernwärmeproduktion (substituiert)	-0,11	Stahlanteil [kg/m ³ BRI]	-0,34
Wirkungsgrad Müllverbrennung – Wärme	-0,09	Sekundärstahlproduktion (Aufwand)	0,20
Betonrecyclingpotential (Substitution)	-0,07	Wirkungsgrad Müllverbrennung – Strom	-0,13
Heizwert – Kohle	0,07	Stromproduktion (substituiert)	-0,13
Heizwert – Holz	-0,07	Betonrecyclingpotential (Substitution)	-0,08
Holzanteil [kg/m ³ BRI]	-0,07	Fernwärmeproduktion (substituiert)	-0,08

Anmerkung: Ein negativer Regressionskoeffizient bedeutet, dass bei steigendem Parameterwert der Wert des Ergebnisses sinkt (also der Beitrag zur globalen Erwärmung abnimmt) und umgekehrt.

Insgesamt unterstreicht die parameter-bezogene Sensitivitätsanalyse den starken Einfluss von Annahmen in Hinblick auf die Substitution von Primärrohstoffen (v.a. Stahl und Beton) auf die Ergebnisse der Bewirtschaftungsszenarien. Außerdem sind auch die Werte in Zusammenhang mit der thermischen Verwertung sowohl hinsichtlich Effizienz (Wirkungsgrade, Heizwerte) als auch hinsichtlich substituierter Energieträger (Strom, Wärme) von großer Bedeutung. Die Materialintensitäten von Stahl und Beton sind besonders für die Szenarien der Variante 2 als kritisch anzusehen. Der Anteil und die Verwertung organischer Materialien (Holz, Kunststoffe) am Gebäude sind ganz besonders für das abiotische Ressourcenabbaupotential und den Primärenergieaufwand der Szenarien relevant (Ergebnisse nicht dargestellt), da sie sich direkt auf den Verbrauch bzw. die Einsparung fossiler Energieträger im Rahmen der Szenarien auswirken.

3.2.3.4 Ansätze für Urban Mining: Herausforderungen, Anreize und Empfehlungen

Herausforderungen

Die Weiternutzung von Bauwerken und Bauteilen beruht auf einem Abbruch bzw. Entkernung, der bestehende Bauteile nicht beschädigt bzw. einen schadensfreien Ausbau von weiterverwendbaren Bauteilen ermöglicht. Ein entsprechender Rückbau muss bereits in der Ausschreibung gefordert werden, was heute in der Regel nicht passiert (Meissner et al. 2018). Es fehlt auch an qualifiziertem Fachpersonal und der Logistik, um Bauteile weiter oder wieder zu verwenden. Außerdem sind besonders in modernen Bauwerken Bauteile oft schwer demontierbar (permanente Verbundarten) und dadurch kaum schadensfrei rückgewinnbar. Neben den Defiziten in Bezug auf den Ausbau bestehen auch Informationsdefizite hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten von ausgebauten Bauteilen. Durch geometrische oder technische Einschränkungen in Zusammenhang mit wiederverwendeten Bauteilen kann auch ein erhöhter Planungsaufwand entstehen, der bei Architekten und Planern Vorbehalte gegenüber dem Einsatz von Alt-Bauteilen hervorruft (Dechantsreiter et al. 2015). Außerdem können Schadstoffe ein Problem für die Wiederverwendung darstellen, wie z.B. mit Holzschutzmittel behandeltes Konstruktionsholz oder mineralische Dämmmaterialien mit inzwischen verbotenen Fasern.

Die Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen wird im Wesentlichen durch die Zusammensetzung der Bauabfälle, die Aufbereitungstechnologie und die möglichen Verwertungswege bestimmt. Generell gilt, dass je sortenreiner ein Abfall anfällt (homogene Materialzusammensetzung ohne problematische Fremdanteile), desto besser und höherwertig dieser verwertet werden kann. Daher stellt ein Abbruch mit hoher Trennschärfe (= Rückbau) die Grundvoraussetzung für effektives Baumaterialrecycling dar. In der Praxis erfolgt der Abbruch jedoch nicht nach den Gesichtspunkten möglichst sortenreiner Materialströme, sondern entsprechend externer Randbedingungen (z.B. Zeit, Baustellenplanung). Zudem sind die erzielbaren Trennschärfen und Qualitäten der Abfallströme bzw. der damit verbundene Aufwand nicht generell vorherzusagen, da jedes Gebäude anders und die Zusammensetzung oft sehr heterogen ist. Eine spezielle Herausforderung stellen auch Schadstoffe und Verbundmaterialien bzw. -systeme dar. Erstere können (bei mangelhafter Entfrachtung) Abfallströme kontaminieren und eine Verwertbarkeit damit ausschließen. Letztere sind oft aufgrund fehlender technischer Lösungen für eine Auftrennung des Verbundes für ein Recycling ungeeignet (z.B. Fassadenwärmedämmungsverbundsysteme).

Im Hinblick auf den Wiedereinbau bzw. die Weiternutzung von Bauwerken oder Bauteilen bestehen rechtliche Unsicherheiten, vor allem was Haftungs- und Gewährleistungsfragen angeht. Für den Wiedereinsatz von konstruktiven Bauelementen bedarf es, mangels genereller Regelungen, einer speziellen Zulassung, was mit entsprechenden Unsicherheiten bzw. Zeit und Kostenaufwand verbunden ist (Dechantsreiter et al. 2015). Für die Wiederverwendung von Produkten, die Stoffe enthalten, die seit ihrer Herstellung verboten wurden, stellt auch das Chemikalienrecht eine Hürde für die Wiederverwendung dar (z.B. PVC-Fensterrahmen aufgrund von Bleistabilisatoren).

Der Einsatz von Recyclingbaustoffen ist mit einem vermeintlichen Haftungsrisiko verbunden, da bei einem nicht zulässigen Einsatz von Abbruchabfällen, die Gefahr der ALSAG-Pflicht bzw. des nicht erfolgten Abfallendes besteht. Hier wurde in Österreich für hochwertige Recyclingbaustoffe mit der Baustoffrecyclingverordnung Rechtssicherheit geschaffen und auch für die beste Recyclingbaustoffqualität (Qualität U-A) ein vorzeitiges Abfallende festgelegt (BMLFUW 2016). Die Recyclingbaustoffverordnung schafft den Rahmen für den verwertungsorientierten Rückbau und macht sowohl Vorgaben hinsichtlich Abbruch- und Rückbauverfahren (ÖNORM 2014), wie auch hinsichtlich der Gütesicherung und Analytik in Zusammenhang mit Recyclingbaustoffen.

Die Weiternutzung bzw. Wiederverwendung von Bauteilen ist mit einem erhöhtem Personal- und Zeitaufwand verbunden, der zu höheren Kosten führt und der oft auch nicht mit dem vorgesehenen Zeitfenster für den Abbruch kompatibel ist. Der Einsatz von qualifiziertem Personal sowie die logistischen Anforderungen (Lagerflächen, Vorhaltebestände, Absatznetzwerke, Transportdistanzen) stellen ebenfalls relevante Kostenfaktoren dar. Die mangelhafte Erfassung und die wenig entwickelten Vermarktungsstrukturen für wiederverwendbare Bauteile und Bauprodukte erschweren den Absatz und bedingen wirtschaftliche Unsicherheiten. Da wiederverwendbare Bauteile oft nur geringfügig bis gar nicht günstiger (hoher Aufwand für Ausbau, Aufarbeitung und Logistik) als entsprechende Neuprodukte auf dem Markt sind, wird die Absetzbarkeit erschwert. Bestehende ökonomische Vorteile vor allem in Bezug auf die Weiternutzung konstruktiver Bauteile werden zudem oft nicht wahrgenommen. Zusätzlich haben gebrauchte Bauprodukte ein Imageproblem, da sie trotz technischem Nachweis oft nicht als gleichwertig mit Neuprodukten angesehen werden (Dechantsreiter et al. 2015).

So wie bei gebrauchten Bauteilen ist auch das Image und die Akzeptanz von Recyclingbaustoffen problematisch, da Vorbehalte gegen ihren Einsatz bestehen, obwohl weder technische noch rechtliche Einschränkungen bestehen. Zudem bieten Recyclingbaustoffe kaum Preisvorteile gegenüber natürlichen Gesteinskörnungen, da die Aufwendungen für ihre Bereitstellung ähnlich hoch sind, wie die Kosten der Primärproduktion. Außerdem können die Anbieter natürlicher Gesteinskörnungen die Preise künstlich niedrig halten und ihre starke Lobby nutzen, um den Marktzugang für Recyclingbaustoffe zu erschweren. Dementsprechend sind die Anreize für die aufwendige Erzeugung von hochwertigen Recyclingbaustoffen begrenzt, ganz besonders trifft das zu, wenn günstige Entsorgungslösungen für mineralische Bauabfälle bestehen. Ähnlich verhält es sich beispielsweise für Altkunststoffe aus dem Baubereich. Da durch die stoffliche Verwertung kaum Erlöse zu erzielen sind, ist eine thermische Verwertung dieser Abfallfraktionen wirtschaftlich attraktiver als ein Recycling.

Anreize und Empfehlungen

Aus Abfall- und Ressourcensicht stellt die Bewirtschaftung des Gebäudeparks und der darin verbauten Materialien eine zentrale Größe in Bezug auf den Materialumsatz der Volkswirtschaft dar. Durch die Etablierung effizienter Bewirtschaftungsmodelle für Altgebäude, die auf Wiederverwendung und Recycling von Baumaterialien abzielen, können Primärrohstoffe und Deponievolumina geschont, Umweltbelastungen reduziert, sowie die Versorgung mit Rohstoffen aus nationalen Quellen gestärkt werden. Lebensdauer verlängernde Maßnahmen und verstärktes Recycling wirken positiv auf die österreichische Volkswirtschaft, da dadurch Wachstum und Beschäftigung gesteigert und regionale Wertschöpfungsketten gestärkt werden. Trotz des Potentials von Gebäuden substantiell zur Entwicklung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft beizutragen, gibt es bisher keine Modelle, die eine integrative Bewirtschaftung von Gebäuden in Hinblick auf die Nutzung der vorhandenen Ressourcenpotentiale ermöglichen. Daher bedarf es zusätzlicher Anreize für Akteur*innen im Bausektor, um den Materialbestand in Gebäuden möglichst lange und effizient zu nutzen.

Die Grundlage für die ressourceneffiziente Nutzung von Bauteilen und Materialien in Altgebäuden stellt der Rückbau als Konzept zur Sanierung bzw. zum wertorientierten Abbau dar. Entsprechende Ansätze sind von Beginn an einzuplanen und in der Ausschreibung eines (Rück-)Bauprojektes bereits vorzusehen. Ein dahingehendes Modell bietet beispielsweise die Initiative „Baukarussell“ an (siehe Abbildung 61). Die Vorgehensweise ist auf die Vorgaben der Recyclingbaustoffverordnung (BMLFUW 2016) abgestimmt und in 5 Phasen gegliedert. Zunächst wird die Schad- und Störstofferkundung ausgeschrieben (1. Schritt) und aufbauend darauf ein Wertschöpfungskonzept zum Rückbau entwickelt (2. Schritt). Danach wird der wertstofforientierte Rückbau ausgeschrieben (3. Schritt) und bereits währenddessen mit der Sicherung von Wertstoffen (Buntmetalle, wiederverwendbare Einbauten bzw. zugängliche Bauteile) des Altgebäudes begonnen (4. Schritt). Schließlich wird im Rahmen der örtlichen Bauaufsicht (5. Schritt) sichergestellt, dass die Vorgaben des wertorientierten Rückbaus umgesetzt werden.

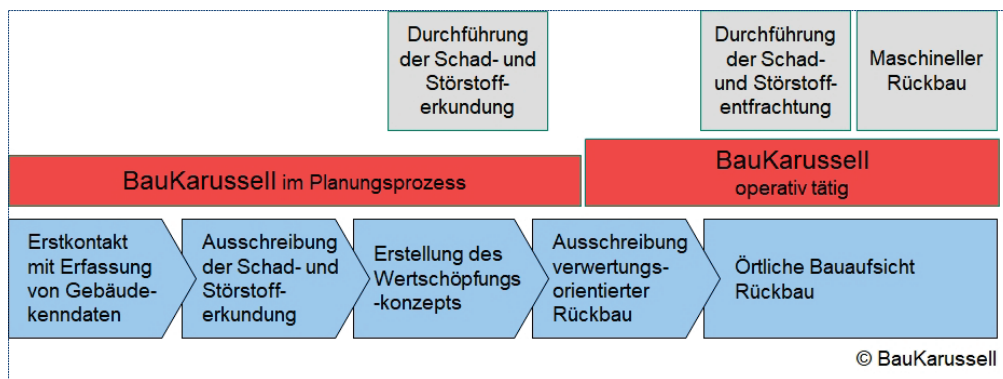


Abbildung 61: Phasen des wertorientierten Rückbaus unter besonderer Berücksichtigung der Wiederverwendung nach (Meissner et al. 2018)

Um Urban Mining für Altgebäude zu forcieren, sind Initiativen wie das „Baukarussell“ notwendig, die Bündnisse und Netzwerke zwischen den klassischen Akteur*innen des Bausektors (Architekturbüros, Baufirmen usw.), abfallwirtschaftlichen Akteur*innen und sozioökonomischen Betrieben etablieren und dadurch Geschäftsmodelle für die ressourceneffiziente Bewirtschaftung von Altgebäuden aufzeigen. Um solche Netzwerke zu unterstützen, bedarf es einheitlicher Regularien zur Zulassung, Haftung und Gewährleistung für die Wiederverwendung von Bauteilen und den Einsatz von Recyclingbaustoffen. In diesem Zusammenhang sind auch einheitliche Standards und Prüfsysteme zu entwickeln, die qualitätsgesicherte Produkte gewährleisten (in Bezug auf Recyclingbaustoffe wurde hier durch die Recyclingbaustoffverordnung bereits Wesentliches geleistet). Außerdem sollten neue Bauprodukte nur dann zugelassen werden, wenn ihre stoffliche Verwertbarkeit grundsätzlich nachgewiesen werden kann (Dechantsreiter et al. 2015).

Plattformen zum Austausch von Informationen in Bezug auf die anfallenden Alt-Bauprodukte bzw. Baumaterialien (z.B. anhand von Gebäudepässen) und Möglichkeiten zum Einsatz von gebrauchten Bauteilen sowie Recyclingbaustoffen (zeitlich und örtlich spezifisch) sollten geschaffen werden, um Angebot und Nachfrage in Einklang zu bringen und wirtschaftliche Planbarkeit von Urban Mining zu verbessern.

Generell sollten Lebenszyklusüberlegungen verpflichtend im Planungsprozess berücksichtigt werden und ein Fokus auf Rückbaufähigkeit und Demontierbarkeit von Baukonstruktionen gelegt werden. Leuchtturmprojekte sollten initiiert werden, um den Einsatz von Alt-Bauteilen und Recyclingbaustoffen zu illustrieren und/oder den Mehrwert rückbauorientierter Designs und recyclinggerechter Konstruktionen deutlich zu machen. Um Architekt*innen und Bauingenieur*innen dahingehend mit Kompetenzen auszustatten, sind ihre Ausbildungen in Hinblick auf die Themen Ressourceneffizienz und Rückbau zu vertiefen. In öffentlichen Ausschreibungen von Baumaßnahmen sollten gebrauchte Bauteile und/oder Recyclingbaustoffe besondere Berücksichtigung finden und wenn möglich dahingehend verpflichtende Einsatzvorgaben gemacht werden. Auf diese Weise können Akteur*innen im Baubereich sensibilisiert, Vorbehalte abgebaut, Einsatzmöglichkeiten aufgezeigt und Märkte geschaffen werden.

Neben der öffentlichen Hand können auch die zunehmende Bedeutung bzw. sogar eine verpflichtende Erstellung von Nachhaltigkeitszertifikaten für Gebäude dazu beitragen, dass Design-for-Recycling und

Reuse oder der Einsatz gebrauchter Bauteile und/oder Recyclingbaustoffe stärker zur Anwendung kommen.

3.2.3.5 Fallstudien-spezifische Fragestellungen

Die spezifischen Fragestellungen, die im Rahmen der Fallstudie behandelt wurden, werden nachfolgend beantwortet.

3A Für welche Bewirtschaftungsvarianten ergeben sich die größten Effizienzpotenziale durch die Verwertung bestehender Gebäude am Beispiel des untersuchten Projektes?

Die Ergebnisse der Fallstudie zeigen, dass die Weiternutzung des bestehenden Tragwerkes die größten Einsparungen aus Klima- und Ressourcensicht erzielt. Im Vergleich zum Abbruch und Neubau des Tragwerks sind die Einsparungen groß genug, um den Ressourcenverbrauch und die Treibhausgasemissionen der späteren Bewohner für ein Jahr zu kompensieren. Neben der Erhaltung von funktionsfähigen Gebäudeteilen leistet auch die Wiederverwendung von Bauteilen bzw. Bauprodukten einen überproportional großen Beitrag (bezogen auf den Massenanteil) zur Umwelt- und Ressourcenschonung im Rahmen der Fallstudie. Der schadensfreie Ausbau und die Weiternutzung von Bauteilen wie Fenstern, Fußböden, Türen usw. sind daher ökologisch sinnvoll. Generell gilt, dass je höher die Demontage- und Sortiertiefe während der Entkernung bzw. während des Abbruchs ist, desto klimafreundlicher und ressourcenschonender ist die Bewirtschaftungsstrategie.

3B Welche ökologischen Effekte (Umweltbelastungen und Ressourcenschonung) werden durch unterschiedliche Nutzungs- und Rückbaustrategien erzielt?

Die Weiternutzung von Bauwerken und Bauteilen leistet den größten spezifischen (pro Tonne) Beitrag sowohl zum Klimaschutz als auch zur Schonung von Energieressourcen und abiotischen Rohstoffen. In Bezug auf die Verwertung und Entsorgung von Abbruchmaterialien ist besonders ein möglichst sortenreiner Anfall (durch gezielten Rückbau) wichtig für eine hochwertige Nutzung der Abfälle. Die Materialströme mit dem größten Potential sind Metalle (Stahl, Aluminium, Kupfer, Zink, Messing), organische Materialien (Holz, Kunststoffe) sowie Beton- und Ziegelabbruch. Je mehr von diesen Materialströmen in Recyclinganwendungen zum Einsatz kommen, die aufwendige Primärproduktionsprozesse substituieren, desto größer ist der Beitrag der Rückbaustrategie zur Umwelt- und Ressourcenschonung. In der vorliegenden Fallstudie sind hier besonders Beton und Stahl hervorzuheben, da es sich beim Modell-Altgebäude um ein Stahlbetontragwerk handelt.

3C Welche Strategien und Rahmenbedingungen sind geeignet, um eine ressourceneffiziente Bewirtschaftung von Altgebäuden zu fördern?

Eine ressourceneffiziente Bewirtschaftung von Altgebäuden sollte möglichst auf die Weiternutzung von Bauwerken und Bauteilen, auf die Wiederverwendung von Bauprodukten und das wertorientierte Recycling von Bauabfällen abzielen. Dementsprechend sollten Abbrüche nach Gesichtspunkten des wertorientierten Rückbaus durchgeführt werden. Daher sind bereits in der Planung des Rückbaues die Aspekte der Wiederverwendung, Wertstoffrückgewinnung und Schadstoffentfrachtung zu berücksichtigen. Die Abläufe und Rückbauphasen sollten danach ausgerichtet werden und nicht (nur) durch externe Faktoren (wie z.B. den Baufortschritt des Neubauprojektes) bestimmt werden. Informationsplattformen, Netzwerke und Märkte für hochwertige Bauprodukte zur Wiederverwendung müssen etabliert werden, um die Nachfrage nach entsprechenden Produkten gewährleisten zu können. Außerdem sind verstärkt Absatzmöglichkeiten und Einsatzgebiete (z.B.

Vorgaben zum Einsatz von Recyclingbaustoffen bei öffentlichen Bauvorhaben in hochwertigen Anwendungen) für qualitätsgesicherte Recyclingbaustoffe zu schaffen, sodass diese auf dem Markt auftreten können und positiv wahrgenommen werden.

3.3 Urban Mining: Workshops

Das Energieinstitut an der JKU Linz hat in Kooperation mit anderen Institutionen in vorangegangenen Projekten aus dem Energiebereich gute Erfahrungen mit der Einbindung von Stakeholdern in einen zielorientierten Einbindungsprozess gemacht. Dazu zählen die F&E-Fahrpläne „Energieeffizienz in der energieintensiven Industrie“, „Energieeffizienz in der Textil- und Lebensmittelindustrie“ sowie „Renewables4Industry - Abstimmung des Energiebedarfs von industriellen Anlagen und der Energieversorgung aus fluktuierenden Erneuerbaren“ (Moser et al. 2014).

Die Vorteile der Einbindung lagen in einem gesellschaftlich breiten Commitment, weil eine gemeinsame, ideale („wünschenswerte“) Zielvorstellung definiert wurde. Unter Wahrung der jeweils individuellen Stakeholder-Interessen konnte fortan über einen Zielpfad zur Erreichung dieser Zielvorstellung diskutiert werden. Als methodisches Fundament dient die IEA Guideline (2014) für Energy Technology Roadmaps. Die beträchtliche Anzahl an „Letters of Intent“ sicherte eine institutionell breite Workshop-Teilnahme und damit robuste Ergebnisse ab. Der Teilnehmerkreis wurde im Zuge der Vorbereitung noch deutlich erweitert. Ziel der Stakeholder-Einbindung ist/war es,

- das in der Praxis langfristig erzielbare Potenzial von Urban Mining zu klären,
- aktuelle rechtliche und marktbedingte Barrieren aufzuzeigen,
- politische Empfehlungen gemeinsam mit den Stakeholdern zu diskutieren bzw. auszuarbeiten
- und erforderliche technische Entwicklungen zu identifizieren.

Der „Fahrplan zu Urban Mining“ inkludiert eine Vision für einen wünschenswerten Status des Urban Mining im weiteren Sinne, den spezifischen Handlungsbedarf in verschiedenen Segmenten und soll dem BMVIT Grundlagen für die Ausschreibung von F&E-Projekten liefern.

3.3.1 Methode und Ablauf

Ein Fahrplan ist ein Synonym für eine Strategie oder einen Projektplan. Der Begriff wird in verschiedensten Forschungs- und Entwicklungsbereichen verwendet, dazu gehören z.B. Forschungsfahrpläne. Kennzeichnend für den Fahrplan sind der vorbereitende Charakter und die grobe Planung der auszuführenden Schritte über einen längeren Zeitraum. Der Fahrplan dient dazu, langfristige Projekte in einzelne leichter zu bewältigende Schritte zu strukturieren, wobei Unsicherheiten und mögliche Szenarien zur Zielerreichung betrachtet werden.

Die Erstellung des Fahrplans „Urban Mining“ folgte dem Vorgehen bei der Erstellung der vorangegangenen Fahrpläne des Energieinstituts und seiner Partner, welche wiederum in Anlehnung an die „Energy Technology Roadmap Guide“ der IEA erstellt wurde (IEA 2014). Die Projektpartner Energieinstitut an der JKU Linz und TU Wien haben im Zuge der Antragstellung bzw. als Vorbereitung der Stakeholder-Einbindung die relevanten Unternehmen und Institutionen identifiziert. Diese wurden persönlich, telefonisch oder per E-Mail angefragt, sich am Erstellungsprozess zu beteiligen.

Erster Schritt im Prozess war die Erstellung einer Vision im Zuge eines Workshops (27. Februar 2018). Die Vision skizziert dabei einen wünschenswerten Zustand für Urban Mining und dessen

Wettbewerbsfähigkeit mit dem Zeithorizont 2050. Auf Basis der in der Vision entwickelten Zielsetzungen wurde in einem zweiten Workshop (12. September 2018) ein Fahrplan entwickelt. Im Folgenden ist der Ablauf der Fahrplan-Entwicklung wiedergegeben:

3.3.1.1 Workshop „Vision“

- Zeit: 27. Februar 2018, 09:30-15:30
- Ort: TU Wien, Gußhausstraße 25-29, 1040 Wien
- Teilnehmer*innen: 26 Anwesende (8 entschuldigt)

Die Teilnehmer*innen wurden auf drei verschiedene Tische aufgeteilt. Nach Begrüßung und Projektinformationen wurden die Teilnehmer*innen gebeten, ihre Vorstellung darüber kundzutun, was für sie Urban Mining ist. Anschließend wurden die Teilnehmer*innen aufgefordert, die Barrieren und Hemmnisse, welche heute Urban Mining verhindern, niederzuschreiben bzw. am Tisch zu präsentieren. Danach sollten die Einzelpersonen einen wünschenswerten Zustand bzgl. Urban Mining für das Jahr 2050 definieren und danach diese in Zweiergruppen verfeinern. Nachdem sich hier klarere und präzisere Visionen ergaben, wurden unter allen Teilnehmer*innen eines Tisches zwei Subgruppen gebildet, um die Gemeinsamkeiten zu visualisieren bzw. anhand sozialer, technischer, ökonomischer, ökologischer und politischer Faktoren zu beschreiben. Im folgenden Schritt wurden die Ergebnisse der sechs Teilgruppen allen Workshopteilnehmer*innen vorgestellt. Es erfolgte eine Diskussion und Identifikation von relevanten Themen.

Agenda

- 09:30 Registrierung / Guten-Morgen-Kaffee
- 10:00 Begrüßung durch den Auftraggeber BMVIT
- 10:05 Hintergrund des Workshops und Einführung zum Projekt
- 10:45 Barrieren und Hemmnisse
- 12:30 Identifikation und Beschreibung eines wünschenswerten Zustands
- 13:45 Zusammenführung der Gruppenergebnisse
- 15:15 Ausblick
- 15:30 Ende

Institutionen der Teilnehmer*innen⁷

- TU Wien - Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement
- Saubermacher Dienstleistungs AG
- O.Ö. Landes-Abfallverwertungsunternehmen AG
- Energieinstitut an der JKU Linz
- Amt der Oö. Landesregierung – Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft
- Energie AG Oberösterreich Umwelt Service GmbH
- Stadt Linz
- Amt der Oö. Landesregierung – Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft
- Montanuniversität Leoben
- BOKU
- Altmetalle Kranner (UrbanMining.at)
- Wiener Netze

⁷ Die Liste ist nach den Nachnamen der Teilnehmer*innen sortiert. Mehrfachnennungen der Institutionen bedeuten, dass eine Institution mehrfach vertreten war.

- TU Wien - Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement
- UFH Holding GmbH
- Energieinstitut an der JKU Linz
- Business Upper Austria (Biz-Up)
- Energieinstitut an der JKU Linz
- Brantner Environment Group GmbH
- Re-Use- und Reparaturnetzwerk Österreich
- Swietelsky
- TU Wien - Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement
- BMVIT
- Altstoff Recycling Austria
- JKU Institut für Betriebliche und Regionale Umweltwirtschaft
- Stadtbaudirektion Wien
- Energieinstitut an der JKU Linz

3.3.1.2 Workshop „Fahrplanerstellung“

- Zeit: 12. September 2018, 12:00-16:00
- Ort: TU Wien, Gußhausstraße 25-29, 1040 Wien
- Teilnehmer*innen: 25 Anwesende (5 entschuldigt)

Wie im Workshop Vision wurden auch im Workshop Fahrplanerstellung die Teilnehmer*innen auf drei verschiedene Tische aufgeteilt. Nach einer Einleitung und Information zu den durchgeführten Fallstudien wurde die Vision des ersten Workshops diskutiert. Grundsätzlich konnte Zustimmung zu den Inhalten der Vision festgestellt werden, es wurde an einzelnen Stellen das Wording diskutiert. Anschließend wurde zu den Maßnahmen zur Erreichung der Vision übergegangen: Zuerst notierten die Teilnehmer*innen die ihrer Ansicht nach wichtigsten Maßnahmen in den Kategorien „Themenfelder der F&E im Bereich Urban Mining“, „Förderungen und andere Incentives“, „Standardisierung und Normen“ sowie „Weiteres“. Am Ende dieses ersten Schritts wurde gebeten, die drei wichtigsten Maßnahmen auf dem Zettel zu markieren. Am Tisch wurden die wichtigsten (oder, wenn schon von jemand anderen angeführt, die zweit-, dritt-, usw. -wichtigsten Maßnahmen) auf den Flipchart geschrieben und diskutiert. Dann wurden am Flipchart die Maßnahmen durch die Teilnehmer*innen gewichtet, indem Punkte vergeben wurden. Abschließend wurde im Podium nochmals nachgefragt, ob nach Meinung der Teilnehmer*innen noch ein wichtiger Punkt fehle. Die finale, entsprechend den Anmerkungen überarbeitete Vision und das Protokoll des zweiten Workshops wurden zur Konsultation an die Teilnehmer*innen des zweiten Workshops versandt. Rückmeldungen wurden eingearbeitet, die Änderungen waren aber marginal und daher nicht nochmals abzustimmen.

Agenda

-
- 12:00 Registrierung inkl. Kaffee und Süßem (kein Mittagessen)
 - 12:30 Begrüßung & Einführung in den Nachmittag
 - 12:40 Update & Informationen zu den durchgeführten Case Studies
 - 13:30 Kaffeepause
 - 14:00 Rückblick: Die gemeinsame Vision
 - 14:15 Workshop: Maßnahmen, um die Vision zu erreichen
 - 16:00 Ende

Institutionen der Teilnehmer*innen⁸

- TU Wien - Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement
- Strabag AG
- Universität Innsbruck
- Wiener Linien
- O.Ö. Landes-Abfallverwertungsunternehmen AG
- Energieinstitut an der JKU Linz
- IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie
- BMVIT
- Amt der Oö. Landesregierung – Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft
- Stadt Linz
- Montanuniversität Leoben
- Altmetalle Kranner (UrbanMining.at)
- BMNT
- TU Wien - Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement
- Pulswerk
- UFH Holding GmbH
- Energieinstitut an der JKU Linz
- Linz Service GmbH
- Re-Use- und Reparaturnetzwerk Österreich
- Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV)
- BOKU
- Wiener Linien
- Swietelsky
- TU Wien - Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement
- Altstoff Recycling Austria
- Stadtbaudirektion Wien
- Energieinstitut an der JKU Linz
- FFG
- ecoplus – Bau.Energie.Umwelt Cluster Niederösterreich

3.3.2 Urban Mining: Definition

Wie schon das Kapitel 3.1 zeigt, unterliegt der Begriff Urban Mining einem sehr ambivalenten Verständnis, das von der Betrachtung städtischer Materiallager bis hin zur gesamten Abfallhierarchie reicht. Ziel der Frage an die Teilnehmer war, aus den Ergebnissen des Workshops die unterschiedlichen, persönlichen Definitionen und Blickwinkel abzuleiten. Wie der folgende Überblick über die gegebenen Antworten zeigt, herrscht ein sehr breites Verständnis zum Thema Urban Mining vor. Auch in einer Expert*innen-Gruppe, wie sie beim Workshop gegeben war, wird durch Urban Mining ein breites Spektrum vor allem in der Abfallwirtschaft abgedeckt. Es zeigt sich, dass sich der Begriff noch nicht konkretisiert hat.

„URBAN MINING IST...“

- *Kategorie: ... die Verwendung/Verwertung des anthropogenen Lagers:*

⁸ Die Liste ist nach den Nachnamen der Teilnehmer*innen sortiert. Mehrfachnennungen der Institutionen bedeuten, dass eine Institution mehrfach vertreten war.

- ... die Rückgewinnung und Nutzung aller aktuellen und potentiellen (zukünftigen) Ressourcenlager aus anthropogenen Quellen am Ende deren Nutzungsdauer.
- ... die Basis für die Substitution von Primärrohstoffen und Rohstoffimporten. Es wird derzeit mehr Material konsumiert als an Abfall anfällt, wodurch das anthropogene Lager wächst und Material akkumuliert. Dieses Material gilt es durch Urban Mining einem sinnvollen Recycling zuzuführen.
- *Kategorie: ... Ressourcen nachhaltig zu nutzen:*
 - ... die maximale Wiedernutzbarmachung von allen Materialströmen, die durch unsere Hände als Gesellschaft gehen.
 - ... Ressourcenschonung durch die Kreislaufführung von Rohstoffen und Materialien – geschlossene Kreisläufe.
 - ... die Erhebung von Daten zur Quantifizierung des Lagers langlebiger Güter, um Ressourcen sinnvoll im Sinne der Wiederverwendung und Verwertung zu nutzen und damit Nachhaltigkeit zu schaffen.
 - ... die bereits aus der Natur entnommenen Ressourcen so intelligent wie möglich zu nutzen.
 - ... die Nutzung von Ressourcen in Gebäuden und Infrastruktur, die das Ende der Lebensdauer erreicht haben.
 - ... Lebenszyklusdenken
 - ... Rückbau, Wiederverwendung, Recycling, Aufbereitung, Reparatur.
- *Kategorie: ... der bewusste Umgang mit Rohstoffen:*
 - ... die Reduktion von Rohstoffverlusten nach dem einmaligen Einsatz durch Deponierung oder thermische Verwertung hin zu einer „Mehrwegnutzung“ von Rohstoffen.
 - ... ein Schlagwort. Urban Mining zielt auf die Ressourcenschonung sowie die Reduktion von Landschaftsverbrauch unter Beachtung von Zielkonflikten zwischen unterschiedlichen Dimensionen wie z.B. Materialverbrauch von Bauwerken, Energieeffizienz von Bauwerken usw. ab.
 - ... die Nutzung sämtlicher Materialien und Stoffe in Produkten am Lebensende, sofern aus Gefährdungssicht und unter werkstofflichen Gesichtspunkten möglich.
 - ... sollte besser als „Ressourcenschutz“ und/oder „Ressourcenwirtschaft“ bezeichnet werden.
 - ... ist eine „Verlagerung“ von Rohstoffen.
- *Kategorie: ... die Schaffung von Wertschöpfung:*
 - ... die Nutzung der verbauten Ressourcen, um regionale Wertschöpfung zu erhöhen und Nachhaltigkeit und Umweltschutz zu fördern.
 - ... die Möglichkeit zur Schaffung von neuen Arbeitsplätzen.
- *Kategorie: ... einfach Recycling:*
 - ... Baurestmassenrecycling (= Infrastrukturerecycling).
 - ... wird schon seit jeher von der Abfallwirtschaft betrieben.
- *Kategorie: ... nicht einfach Recycling:*
 - ... ist NICHT Abfallwirtschaft & Deponie.
- *Kategorie: Sonstiges:*
 - ... sollte zu einer Bewusstseinsbildung führen.

3.3.3 Urban Mining: Hemmnisse und Barrieren

Das Ziel der Frage war, aus den von den Teilnehmer*innen angeführten Hemmnissen und Barrieren eine Liste abzuleiten, die möglichst im vollen Umfang, aber auch detailliert die genannten Aspekte widerspiegelt. Die Antworten wurden im Folgenden kategorisiert.

KATEGORIE RECHTLICH

- Es fehlen gesetzliche Regelungen, um sinnvolle, breite und effiziente Maßnahmen zur Ressourcenschonung umzusetzen (z.B. Steuern, Förderungen, Verbote, Gebote).
- Die aktuelle Rechtslage bedingt eine Ungleichbehandlung von Primär- und Sekundärrohstoffen. Zum Beispiel sind umweltanalytische Anforderungen bei Sekundär- oft strenger als bei Primärrohstoffen.
- Da es sich aufgrund der Rechtslage bei Sekundärrohstoffen oft um Abfall (subjektiver und objektiver Abfallbegriff) handelt, ist der Einsatz von Sekundärrohstoffen (=Abfall) aufgrund fehlender Genehmigungen oft nicht möglich oder erschwert.
- Rechtssicherheit und Haftungsfragen beim Einsatz von Sekundärrohstoffen sind oft ungeklärt und verhindern den Einsatz (Stichworte: Abfallende, ALSAG).
- Technische und rechtliche Rahmenbedingungen sind oft ein Hemmnis und verhindern beispielweise Re-Use von Li-Ionen-Batterien.
- Unterschiedliche Gesetzeslagen – EU-weit und national.
- Gesetzliche Ungleichstellung zwischen Produzenten und Abfallwirtschaft; Abfallwirtschaft sieht sich benachteiligt, da z.B. Industrie Nebenprodukte einfacher rezyklieren kann.
- Fehlende, gesetzliche Verpflichtungen zur Aufbereitung von gewissen Materialien.
- Manche Materialien in Alt-Produkten dürfen in Neuprodukten nicht eingesetzt werden (z.B. FCKW in Alt-Kühlgeräten) und es gibt daher keine Verwertungsmöglichkeit.

KATEGORIE SOZIOLOGISCH

- In vielen Bereichen herrscht eine geringe gesellschaftliche Akzeptanz für Sekundärrohstoffe. Es fehlt das Bewusstsein in der breiten Masse, wie es zum Beispiel beim Thema „Energiesparen“ schon teilweise vorhanden ist.
- Image/Wahrnehmung der Sekundärrohstoffe betreffend möglicher Verunreinigungen etc. → Not In My Backyard
- Das Image von Sekundärrohstoffen ist nicht gut. Es gibt begründete (tatsächlicher Qualitätsverlust durch „Abbau“) und unbegründete (Image) Vorbehalte gegenüber dem Einsatz von Sekundärrohstoffen aufgrund von Qualität, Schadstoffaspekten oder Kundenwahrnehmung. Aus Studien unter Industrieunternehmen ist beispielsweise bekannt, dass Sekundärrohstoffe in fast allen Branchen eingesetzt werden, aber die Unternehmen oft nicht darüber sprechen (eine Ausnahme stellt hier nur die Getränkeindustrie mit ihrer Nachhaltigkeitsagenda dar).
- Nur eine Branche spricht über Rezyklierbarkeit, andere setzen auch schon Rezyklate ein, sprechen aber nicht darüber → Die Unternehmen befürchten ein schlechtes Image beim Kunden, z.B. werden Qualitätsmängel befürchtet.

KATEGORIE TECHNISCH

- Die Material- und Produktentwicklung ist nicht „nachnutzungsorientiert“.
- Produkte werden in erster Linie für die Nutzung entwickelt ohne Berücksichtigung der Entsorgung und des Recyclings. Außerdem ist das Produktdesign auf Einmalnutzung ausgelegt und nicht auf Reparierbarkeit oder Aufrüstbarkeit. „Design-for-Re-Use“ oder „Design-for-Recycling“ sind noch immer nur Schlagworte.
- Es fehlen die Technologien, um manche Materialien einem Recycling zuzuführen.
- Schlechtes und nicht nachhaltiges Produktdesign.

KATEGORIE ÖKOLOGISCH

- Es fehlt die systematische Erfassung der anthropogenen Lagerstätten und damit stellt sich die Frage – was wurde wo und wann verbaut?
- Zeitfaktor: Die Geschwindigkeit, mit der Rohstoffe im Kreislauf geführt werden, wird meist nicht berücksichtigt.
- In manchen Fällen bestehen Unsicherheiten bezüglich der besten Verwertungsoption, die durch entsprechende Bewertungswerkzeuge zu identifizieren ist (manchmal auch nicht dominant, d.h. je nach Zielsetzung unterschiedlich). Bei Bauwerken sollte aber beispielsweise gelten: Funktion nutzen vor Struktur nutzen vor Material nutzen. D.h. Weiternutzung ist vor Sanierung anzustreben und Sanierung wiederum vor Abbruch und Recycling.
- Geänderte Einstufung eines Stoffes bzw. Materials z.B. als gefährlicher Abfall → Abfallwirtschaft muss flexibel sein und sich darauf einstellen.
- Die Versorgungs- und Planungssicherheit ist auch für Recyclingprozesse zentral. In Bezug auf Abfälle ist es oft schwierig, zukünftige Rohstoffverfügbarkeiten in Menge und Qualität vorherzusagen. Beispielsweise geben Abbruchunternehmen den Gehalt an Wertstoffen in einem Bauwerk nicht bekannt, da sie durch den Verkauf zusätzliche Erlöse erzielen können

KATEGORIE WIRTSCHAFTLICH

- Investitionen sind aufgrund volatiler Rohstoffpreise mit einem hohen Risiko verbunden.
- Die Aufbereitung von Sekundärressourcen führt zu hohen Kosten, da eine Schad- und Störstoffentfrachtung notwendig ist.
- Verteilungsgerechtigkeit von Ressourcen aller Art fehlt – Gesellschaft beraubt sich selbst.
- Fehlen eines strukturierten methodischen Ansatzes zur Aufbereitung der Daten und validen Bewertung - insbesondere des Kosten-/Nutzen-Verhältnisses von neuen Nutzungspfaden für zukünftige Potentiale an Sekundärreststoffe.
- Keine „Kostenwahrheit“ in der Bewertung von Primär- und Sekundärrohstoffen.
- Im Vergleich zu Primärlagerstätten ist die Datenlage in Bezug auf Vorkommnisse (Menge, Qualität) und Lage von Urban Mining Potenzialen/Ressourcen als Basis für Urban Mining unzureichend. Es gibt grobe Zahlen zu den vorhandenen Mengen, aber es mangelt an Informationen, wo welche Materialien in welcher Menge und Güte vorliegen.
- Der Markt für Sekundärrohstoffe fehlt teilweise. Potentielle Abnehmer haben Bedenken hinsichtlich der Qualität, der Vorgaben für den Einsatz (Normen, Regelungen) und der technischen/schadstofflichen Eignung der Materialien.
- Durch die lange Aufenthaltsdauer von Materialien in Gebäuden und Infrastruktur sowie anderen langlebigen Konsumgütern besteht oft eine Diskrepanz zwischen dem Materialeinsatz in Neuprodukten und den Materialien, die in Alt-Produkten bzw. Abfällen anfallen. Dementsprechend ist es nicht klar, ob Materialien aufgrund technologischer Veränderungen (v.a. bei Elektrogeräten ist diese Entwicklung oft rasant) bzw. geänderter Produktspezifikationen überhaupt am Ende der Produktlebensdauer noch hochwertig verwertbar sind.
- Die Kosten für die Abtrennung von (in geringen Konzentrationen vorliegenden) Materialien aus dem Abfallstrom sind oft größer als die erzielbaren Erlöse (besonders problematisch ist hier der Trend zu Verbundwerkstoffen oder komplexen Elektronikbauteilen). Es besteht ein Zielkonflikt zwischen der Minimierung des Primärrohstoffeinsatzes und der wirtschaftlichen Beschaffung (Aufbereitung & Recycling) von Sekundärrohstoffen, der durch Wettbewerbsnachteile für die Sekundärrohstoffseite (Stichwort: externe Effekte und Subventionen von Primärrohstoffabbau) begründet bzw. verstärkt wird. „Primärrohstoffe sind zu billig“.

- Der Einsatz besonders knapper Ressourcen aus Primärquellen (z.B. Technologiemetalle) schlägt sich kaum im Produktpreis nieder.
- Die Mobilisierung von Rohstoffen aus dem anthropogenen Lager ist nicht einfach – Stichwort: nicht genutzte Handys in Schubladen. „Es fehlt der persönliche Anreiz den Rohstoff frei zu geben“.
- Es fehlt der Überblick bzgl. Quellen und Senken von/für Sekundärmaterialien.
- Preisvolatilität von Primärressourcen bestimmt Absatzmöglichkeiten von Sekundärrohstoffen.
- Erstellung, Betreuung und Aktualisierung von Ressourcenkatastern. Wer ist dafür zuständig und wer trägt die Kosten?
- Aufgrund noch zu geringer Mengen ist die „Versorgungssicherheit“ der Recyclingprozesse noch nicht gesichert.
- Bestehende Zielkonflikte: Architektur, Energieeffizienz, Materialeffizienz, wirtschaftliche Effizienz.
- Fehlende Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungskette – Aufbau von Recyclingnetzwerken, verstärkte Zusammenarbeit Produzenten/Reduzenten.
- Fehlende Kooperation zwischen Produzenten und der Abfallwirtschaft.
- Das derzeitige Wirtschaftssystem ist nicht gesamtheitlich und nachhaltig ausgelegt.
- Die Entsorgung von Materialien ist zu billig.
- Keine Kostenwahrheit bei Produkten.
- In Frage gestellt: Gibt es genügend Sekundärressourcen - in gewissen Bereichen - um konkurrenzfähig mit Primärressourcen zu sein?
- Volatilität von Märkten und dadurch un stetige Recycling-/Sekundärrohstoffpreise.

3.3.4 Urban Mining: Vision 2050

Die Vision skizziert einen wünschenswerten Zustand für „Urban Mining“ in Österreich im Jahr 2050. Urban Mining ist dabei im weiteren Sinne zu verstehen. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus Unternehmen, Fachverbänden, Interessenvertretungen und Forschungseinrichtungen skizzierten dabei ihre Vision, d.h. den nach ihren Vorstellungen wünschenswerten Zustand. Diese individuellen Visionen wurden im Zuge des Workshops nach und nach zu einer gemeinsamen Vision verdichtet. Bitte beachten Sie: Eine Politisierung der Vision im Sinne einer Ableitung gesetzlicher Verpflichtungen wäre missverständlich und ist zu vermeiden. Bei der Vision handelt es sich nicht um eine politische Zielsetzung, deren Erreichung im Einfluss einzelner Akteurinnen oder Akteure liegt, ebenso wenig wurde die technische Machbarkeit überprüft oder Szenarien entwickelt. Im Fokus steht die Formulierung von wünschenswerten Zielen, die auf sektoraler oder sektorübergreifender Ebene kurz-, mittel- und langfristig unterschiedlichen Maßnahmen und Aktivitäten bedürfen, um die formulierten Ziele zu erreichen.

URBAN MINING (2050)

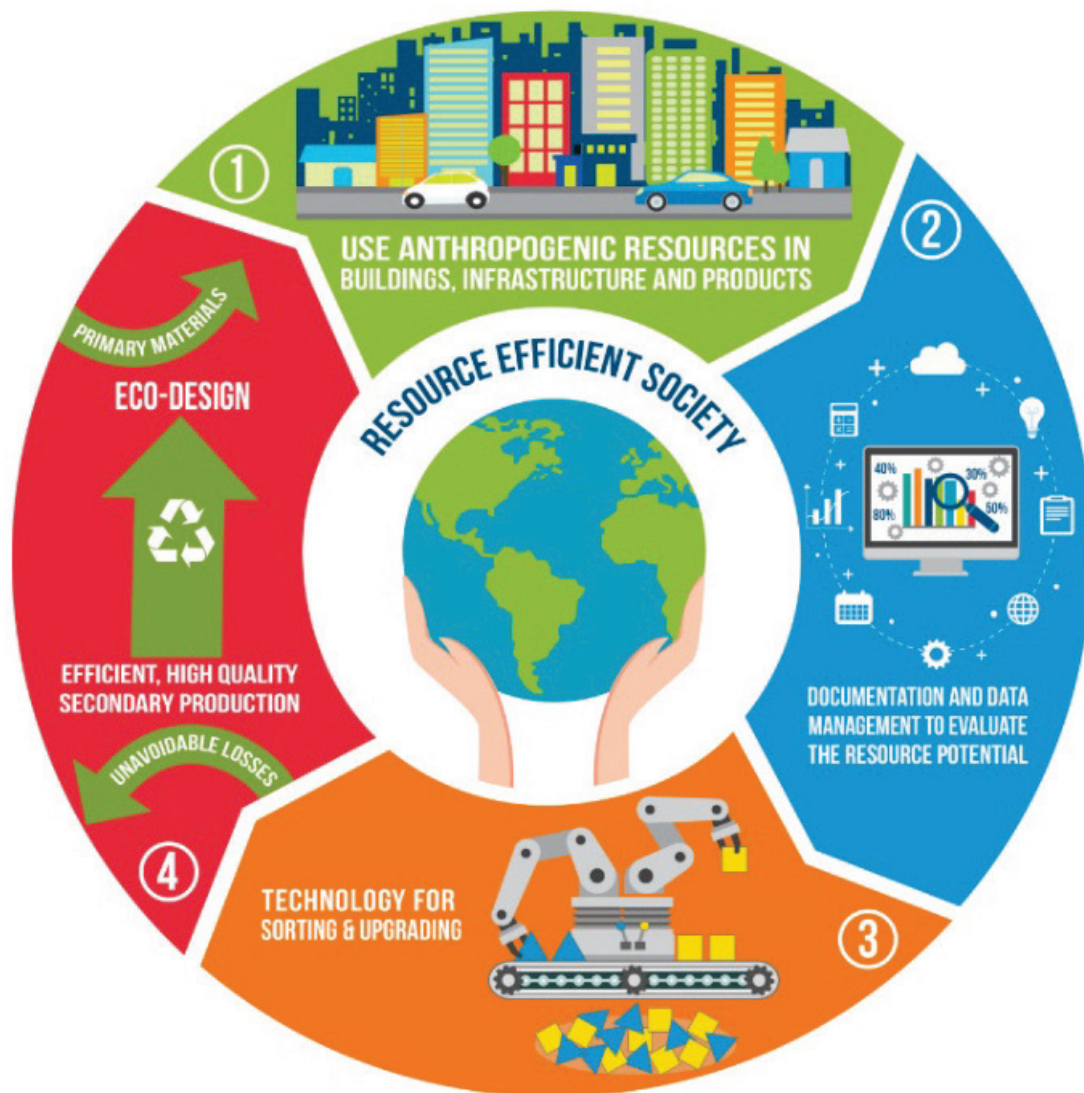


Abbildung 62: Vision Urban Mining im Jahr 2050 (Quelle: Energieinstitut an der JKU Linz)

URBAN MINING VISION 2050

Im Jahr 2050 sind das Umweltbewusstsein und daher die Akzeptanz von Sekundärrohstoffen seitens der Bevölkerung sehr hoch. Nachhaltige und recycelbare Produkte werden allgemein präferiert. Kreislaufwirtschaft und Urban Mining erfüllen die Bedürfnisse der Menschen. Die industrielle Erzeugung von Produkten aus Sekundärrohstoffen ist Standard. Die Rohstoffeffizienz wird durch modernes Konsumieren - z.B. Teilen statt Besitzen - und die entsprechenden produktbegleitenden Dienstleistungen weiter erhöht.

Urban Mining ist eine Basis für die Energie- und Ressourceneffizienz in der Stadt sowie für die Ressourcen-Resilienz der Volkswirtschaft. Urban Mining bzw. Sekundärrohstoffe decken den allgemeinen Rohstoffbedarf im Jahr 2050 im maximalen Ausmaß, unter Maßgabe ökonomischer, ökologischer und sozialer Faktoren, wobei der Anteil am Rohstoffeinsatz mindestens 80% beträgt. Primärrohstoffe werden nur zum Ausgleich unvermeidbarer technischer Verluste eingesetzt oder um einen etwaigen Mehrbedarf zu decken. Es erfolgt eine effiziente Störstoffausschleusung und Schadstoffentfrachtung zur Wahrung sauberer Kreisläufe. Deponien und weitere ungenutzte Materialbestände (z.B. stillgelegte Leitungen im Untergrund) werden zu Ressourcenlagerstätten - sie sind die Bergwerke der Zukunft.

Produkte werden unter Beachtung des gesamten Lebenszyklus gestaltet (Ökodesign), so dass erneuerbare oder Sekundärrohstoffe eingesetzt werden, eine hohe Lebensdauer erzielt und eine energieeffiziente Nutzung gewährleistet wird. Produkte und Inhalte sind modular, reparierbar, recyclingfähig bzw. für die Wiederverwendung optimiert. Der Verwertungspfad am Ende der Lebensdauer ist bereits vor dem In-Verkehr-Bringen bekannt, mechanisch trennbare Verbunde werden verwendet und gefährliche Materialien nicht eingesetzt. In den Städten werden Strukturen, Flächen und Standorte optimal genutzt; neu errichtete Gebäude sind hocheffizient, modular aufgebaut und an sich ändernde Nutzungsformen anpassbar.

Technologische Fortschritte werden einen wesentlichen Beitrag leisten, um den Anteil der Sekundärrohstoffe am Rohstoffeinsatz anzuheben. Die Sekundärrohstoffe sind technisch gleich- oder höherwertig und werden dadurch vom Markt absorbiert. Informationen zu Rohstofflagern und -flüssen sind hinsichtlich Menge und Qualität in ausreichender zeitlicher und räumlicher Auflösung vorhanden. Die stoffliche Zusammensetzung der eingesetzten Materialien, deren Lage und der Zeitpunkt einer möglichen Verfügbarkeit werden für alle Güter inventarisiert. Dazu tragen Ressourcenkataster, Inventarisierung, Building Information Modeling, Recyclingplattformen und die dafür benötigten und verfügbaren Daten bei. Um dies zu erreichen, wurden die Zuständigkeiten für die Inventarisierung, die laufende Aktualisierung der Datenbanken sowie deren Finanzierung geklärt. Die Datenbanken sind transparent und nutzerfreundlich für alle Stakeholder zugänglich. Dadurch ist die Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen ähnlich zu Primärlagerstätten bewertbar und planbar.

Sekundärrohstoffe entsprechen im Jahr 2050 in allen Bereichen, v.a. rechtlich, denselben Anforderungen wie Primärrohstoffe. Außerdem führen die Internalisierung von Umweltkosten und das Ende der staatlichen Unterstützung der Primärrohstoffgewinnung dazu, dass Sekundärrohstoffe wirtschaftlich günstiger sind. Zielkonflikte zwischen Recycling, Energieaufbringung und Sicherheit sind erforscht und Optima identifiziert. Die Politik unterstützt den Weg zu maximalen Sekundärrohstoff-Anteilen in Produkten unter Beachtung der Lebenszyklen.

3.3.5 Urban Mining: Fahrplan zur Erreichung der „Vision 2050

Die nachfolgend angeführten Maßnahmen zur Erreichung der Urban Mining Vision 2050 wurden gemeinsam mit den Expertinnen und Experten entwickelt. Für die Umsetzung der Maßnahmen wird im Sinne eines Fahrplans zwischen eher kurzfristig umzusetzenden (bis 2025) und eher langfristig umzusetzenden Maßnahmen (ab 2025) unterschieden.

Tabelle 17: Fahrplan zur Erreichung der „Vision 2050 für Urban Mining: Kategorie Forschung und Entwicklung

KATEGORIE: FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG	
eher kurzfristig umzusetzende Maßnahmen „bis 2025“	eher langfristig umzusetzende Maßnahmen „ab 2025“
<p><u>Technologische Forschung & Entwicklung</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Weiterentwicklung der Automatisierung im Wiederaufbereitungsprozess • Materialeffizienz und Materialforschung mit Fokus auf Wiederverwertbarkeit • Entwicklung von neuen Recyclingtechnologien für bereits vorhandene Materialien sowie Steigerung der Recyclingeffizienz • Entwicklung und Einsatz von Verfahren zur abbruchfreien Detektion von Leitungen in tieferen Ebenen (z.B. mittels Ultraschall, Drohnen) • Entwicklung von kostengünstigen Methoden zur chemischen Charakterisierung von Abfällen 	<p><u>Technologische Forschung & Entwicklung</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung und Anwendung von Robotik und künstlicher Intelligenz zur Bauteilerkennung, -ausbau und -charakterisierung • Weiterentwicklung von Technologien (z.B. Satellitenaufnahmen) zur Abschätzung des anthropogenen Rohstofflagers • Weiterentwicklung von Technologien für den Ausbau, die Trennung, Sortierung und Extraktion von Materialien und Bauteilen bei gleichzeitiger Reduktion des wirtschaftlichen und technischen Aufwandes
<p><u>Systemische Forschung & Entwicklung</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Durchführung von Forschungsprojekten zum verbesserten Recycling (z.B. Trennung, Upcycling) • Untersuchung und Umsetzung von Ökodesign- und Design-for-Reduce-Ansätzen sowie schnellere Umsetzung von Ökodesign. • Untersuchung von möglichen Anreizsystemen zur Schaffung von Sekundärrohstoffmärkten (z.B. Bauteilbörsen) • Neue Ausschreibungen in Forschungsprogrammen (z.B. CO₂-arme, recyclingfähige Baustoffe aus Abfällen und Nebenprodukten) • Entwicklung neuer Geschäftsmodelle für Recycling, Wiederverwendung, Sekundärrohstoffe etc. • Systematische Erhebung bzw. Inventarisierung des anthropogenen Lagers durch Erstellung und Pflege eines Ressourcenkatasters (z.B. für Gebäude, Infrastruktur, Produkte, etc.) inkl. der Digitalisierung von Stoffströmen • Etablierung/Nutzung von Building Information Modelling (BIM) zur Identifizierung und Verortung nutzbarer Ressourcen und Bauteile • Erhebung der Bedarfe an Sekundärrohstoffen (Art, Menge, Art der Beschaffung, etc.) • Detaillierte Untersuchung technisch möglicher Substitutionsgrade von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe 	<p><u>Systemische Forschung & Entwicklung</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Etablierung eines Verzeichnisses über die Zusammensetzung aller Güter sowie die Bestände und Lager (anthropogene Rohstoffreserven) und die Verfügbarkeit von Materialien in interaktiven GIS-Karten • Steigerung der Recyclingfähigkeit durch verstärktes Design-for-Recycling und Verlängerung der Lebensdauer von Gütern • Schaffung von kommerziellen Bauteillagern und Vernetzung von Baustellen • Neue Ausschreibungen in Forschungsprogrammen (z.B. gekoppelte Material- und Energiegewinnung durch fortschrittliche thermische Abfallbehandlung)

Tabelle 18: Fahrplan zur Erreichung der „Vision 2050 für Urban Mining: Kategorie Förderung, Steuern, Verpflichtungen

KATEGORIE: FÖRDERUNGEN, STEUERN, VERPFLICHTUNGEN	
<i>eher kurzfristig umzusetzende Maßnahmen „bis 2025“</i>	<i>eher langfristig umzusetzende Maßnahmen „ab 2025“</i>
<p><u>Verpflichtungen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Verpflichtende Nutzung und Pflege eines Building Information Modelling (BIM) mit der Hinterlegung einer 3D-Bauwerksplanung inkl. Daten zu Material und Gewicht der verbauten Teile. • Verpflichtung des Bauträgers, die Auftragnehmer anhand einer regelbasierten Prüfung hinsichtlich Materialauswahl auszuwählen (Nutzung BIM-Modelle) • Selbstverpflichtung zum Einsatz von Sekundärrohstoffen (Mindestrate) oder verpflichtender Einsatz von Sekundärrohstoffen • Änderungen im Vergaberecht: • Bevorzugung von Sekundärrohstoffnutzungen und verpflichtende Forderung eines BIM ab einem bestimmten Vergabewert sowie Schaffung bestimmter Kriterien für die öffentliche Hand als Auftraggeber (z.B. Quote für Sekundärrohstoff als Ökokauf-Kriterium); Kreislaufwirtschaft soll Bedingung werden • Rechtliche Verpflichtung zur Meldung von Massenströmen bei Bau, Sanierung und Abbruch an ein (Ressourcen-)Kataster sowie Verpflichtungen zur Inventarisierung • Verpflichtende Lebenszyklusanalyse 	<p><u>Verpflichtungen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Lebenszykluskosten, Umweltkosten und graue Energie als verpflichtendes Vergleichskriterium und Heranziehung von Umweltkosten in der Projektkalkulation • Einführung einer Beschränkung für den Abbau von Primär-Massenrohstoffen (z.B. Kies und Schotter) • Vereinheitlichung der Regelungsanforderungen an Primär- und Sekundärprodukte • Verpflichtung zum Einsatz von Recyclingbaustoffen und Nachweispflicht zur Notwendigkeit des Einsatzes von Primärrohstoffen („comply or explain“) • Festlegung einer gesetzlichen Substitutionsquote von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffen bzw. Schaffung einer „Sekundärrohstoffpflicht“ • Festlegung von Quoten für die Rezyklierbarkeit von Produkten, die in Verkehr gebracht werden
<p><u>Förderungen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Förderungen für Designer, die sich gezielt mit Reuse und Recycling beschäftigen sowie verstärkte Forschungsförderung für die Recycling- und Materialforschung • Förderungen für Reuse und die Nutzung nachwachsender Rohstoffe • Spezifische Förderung für den Abbau von Gebäuden, um den Zeitaufwand wirtschaftlich zu kompensieren und damit Abbruch zu verhindern sowie gesetzliche Definition der Wiedernutzung als vorrangig gegenüber dem Abbruch • Entwicklung und Umsetzung eines Instruments für die Steuerung des Sekundärrohstoffmarktes 	<p><u>Förderungen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Förderungen im Bereich „Urban Mining“ sind kurzfristig umzusetzen. Langfristig sollte Urban Mining ohne Förderung durch eine Veränderung der Marktgegebenheiten vorangetrieben werden <p><u>Steuern</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Ökologieorientierte Steuerreform: Einführung einer Ressourcensteuer mit gleichzeitiger Senkung der Besteuerung von Arbeit und die Internalisierung von Umweltkosten • Schaffung von steuerlichen Anreizen für die Nutzung von Sekundärrohstoffen

Tabelle 19: Fahrplan zur Erreichung der „Vision 2050 für Urban Mining: Kategorie Standardisierung und Normen

KATEGORIE: STANDARDISIERUNG UND NORMEN	
<i>eher kurzfristig umzusetzende Maßnahmen „bis 2025“</i>	<i>eher langfristig umzusetzende Maßnahmen „ab 2025“</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Abstimmung der Materialauswahl in der Produktion auf Wiederverwertbarkeit • Neue Standards und Normen: Einführung von Standards für die Veröffentlichung von Daten zur Produktzusammensetzung sowie Schaffung von Normen zur Standardisierung von Safe-by-Design- und Recycling-by-Design-Normen (ISO), u.a. mit Fokus auf die Rezyklierbarkeit • Standardisierung von Begrifflichkeiten und der Berechnungsmethoden, z.B. für Recyclingquoten • Definition von Anteilen an zu verwendendem Sekundärrohstoffen • Gewährleistung transparenter, demokratischer Normungsprozesse • Nachweispflicht der Gemeinwohlverbesserung bei der Entwicklung von Normen und öffentlichen Begutachtungsverfahren • Schaffung von harmonisierten und gleichwertigen Standards für Primär- und Sekundärrohstoffe sowie einfache Zertifizierungsmöglichkeiten für Produkte aus Sekundärrohstoffen und Gleichsetzung von rezykliertem Material und neuem Material • Etablierung eines Labels für ressourceneffiziente Gebäude • Vermeidung von „golden plating“ bei der Normung – Festlegung von Standards nach technischer Notwendigkeit nicht unter Ausschöpfung der heutigen technischen Möglichkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Definition von klaren Anforderungen an Primär- und Sekundärrohstoffen • Steuerung des Marktes zur Verwendung von Sekundärrohstoffen • Festlegung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen als Standard • Schaffung von normierten Mindestanforderungen für Ökodesign und Sekundärrohstoffersatz sowie gleichgestellte Qualitätsanforderungen für Primär- und Sekundärrohstoffe und gleichbedeutende Normung für Primär- und Sekundärrohstoffe

Tabelle 20: Fahrplan zur Erreichung der „Vision 2050 für Urban Mining: Kategorie weitere Maßnahmen

KATEGORIE: WEITERE MAßNAHMEN	
<i>eher kurzfristig umzusetzende Maßnahmen „bis 2025“</i>	<i>eher langfristig umzusetzende Maßnahmen „ab 2025“</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung und Durchführung von Maßnahmen zum Imagewandel von Sekundärprodukten • Etablierung und Vermarktung einer Baustoffbörse • Verstärkte Bildung, Öffentlichkeitsarbeit, Bewusstseinsbildung und Einbindung der Gesellschaft zur Verbesserung des Images von Sekundärrohstoffen, zur Schaffung einer „Second-Hand“-Kultur und Kommunikation des Werts von Rohstoffen • Vergabe von Gewährleistung und Garantie auf die gesamte Lebensdauer sowie verpflichtende Kennzeichnung der zu erwartenden Lebensdauer • Erhöhung des ALSAG für die Deponierung • Vergabe von Förderungen nur noch für nachweislich zukunftsfähige Projekte/Produkte/Leistungen • Verstärkte Verknüpfung von Politikfeldern (z.B. Verknüpfung von Kreislaufwirtschaft, Bioökonomie und Arbeitsmarktpolitik 	<ul style="list-style-type: none"> • Vereinheitlichung von Rechtsmaterien: „Umweltmaterialrecht“ anstatt der Trennung von „Chemikalien- und Produktrecht“ sowie „Abfallrecht“ • Änderungen im Konsumverhalten anstoßen: „Qualität vor Menge“ • Entwicklung und Etablierung von neuen Gesellschaftsmodellen: „nutzen statt besitzen“

Aus dieser Vielzahl an Maßnahmen wurden gemeinsam mit den Expertinnen und Experten im Rahmen des Workshops jene Maßnahmen identifiziert, die als essentiell für das Erreichen der Vision zum Urban Mining im Jahr 2050 erscheinen (Gewichtung durch die Vergabe von Punkten). Diese prioritär umzusetzenden Maßnahmen werden nachfolgend illustriert und stellen den Kern des Fahrplans für Urban Mining 2050 dar.

MAßNAHMEN ZUR ERREICHUNG DER „URBAN MINING VISION 2050“

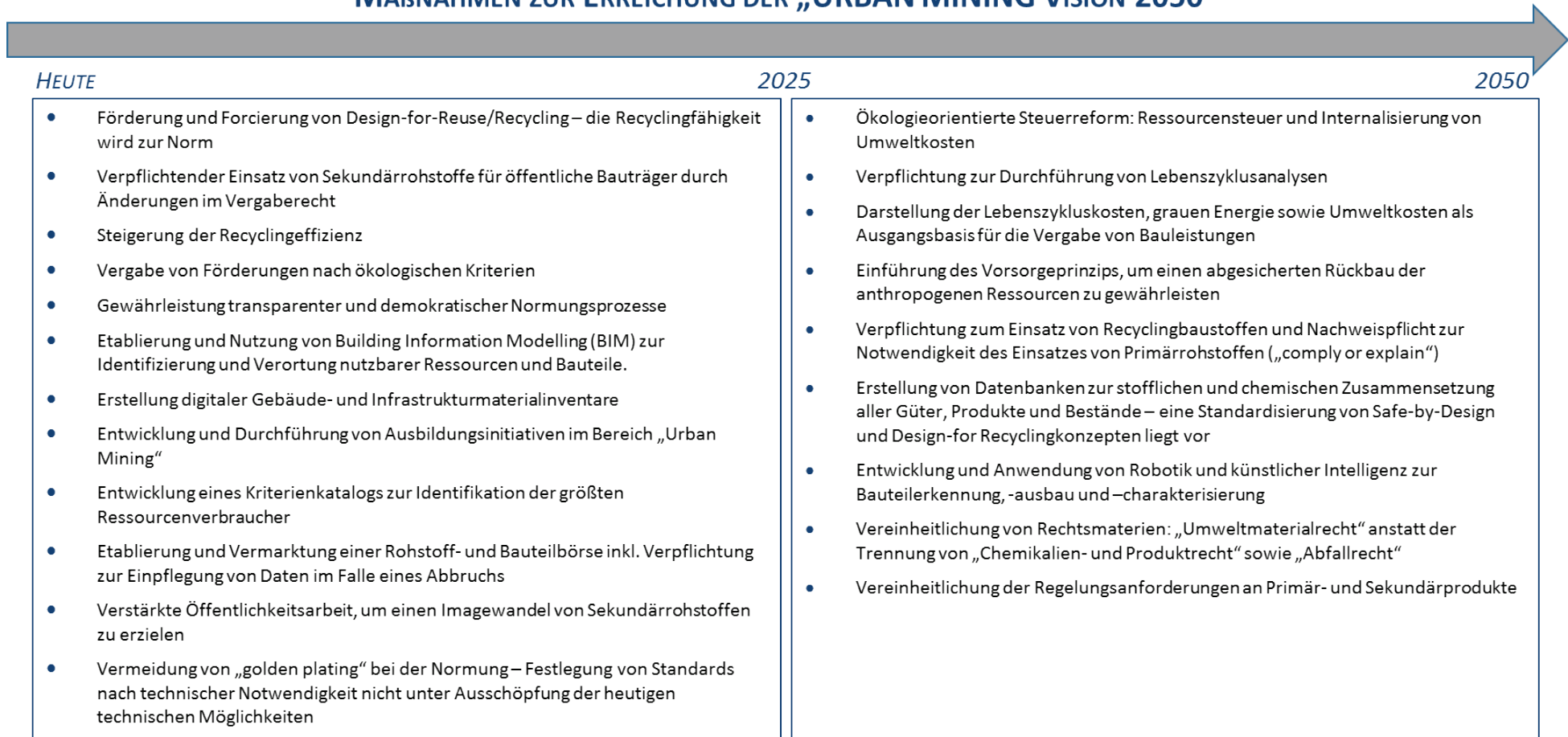


Abbildung 63: Maßnahmen zur Erreichung der „Urban Mining Vision 2050“

3.3.6 Zentrale Aussagen aus der Stakeholder-Einbindung

Urban Mining ist als Begriff zu wenig definiert bzw. wird er selbst von Expert*innen zu wenig konkret angewandt. Es wird empfohlen, entweder eine Schärfung des öffentlichen Begriffsbilds zu forcieren oder bei der Öffentlichkeitsarbeit, bei der Beschaffung oder Ähnlichem konkret das gewünschte Teilgebiet anzusprechen.

Die Vision skizziert einen wünschenswerten Zustand für „Urban Mining“ in Österreich im Jahr 2050: Gemäß dieser ist Urban Mining im weiteren Sinne zu verstehen; Urban Mining bzw. Sekundärrohstoffe decken den allgemeinen Rohstoffbedarf im Jahr 2050 im maximalen Ausmaß, unter Maßgabe ökonomischer, ökologischer und sozialer Faktoren, wobei der Anteil am Rohstoffeinsatz mindestens 80% beträgt.

Die gemäß der Gewichtung beim Fahrplan-Workshop hervorgehobenen, wichtigsten Maßnahmen sind alle systemischer oder regulatorischer Natur bzw. zeigt keine der im Workshop gemeinschaftlich als wichtig eingestuften Maßnahmen einen technischen Entwicklungsbedarf auf. Anzumerken ist, dass Maßnahmen der Datenerfassung (z.B. Datenbanken, BIM) hier unter ersterem subsummiert wurden.

Die Expert*innen sind sich weitgehend einig, dass Datenerfassung und -wartung der Grundstein für Urban Mining sind. Fehlende Informationen zu Bestand und Abfallströmen verursachen die bestehende, mangelnde (Wieder)Verwertbarkeit.

3.4 Urban Mining: Zusammenfassung

Ziel der Synthese der Ergebnisse ist es, die Fragestellungen gemäß Ausschreibung zu beantworten und im weiteren Empfehlungen für die Umsetzung von Urban Mining Strategien zur Steigerung der Ressourceneffizienz auf städtischer Ebene abzuleiten. Dabei sind folgende Fragestellungen von Bedeutung:

- A. Wo ergeben sich größere Effizienzpotenziale bei der Verwertung bestehender Infrastrukturen? In welchem Verhältnis steht der Material- zum Energieeinsatz?
- B. Wie kann das Interesse einzelner Hersteller*innen bzw. der Industrie erhöht werden, die Rückgewinnung von Rohstoffen zu erhöhen? Welche Modelle, Konzepte oder Anreize gibt es?
- C. Welcher Mehraufwand (Energie, Kosten) entsteht bei der Herstellung recyclingfähiger Produkte und Komponenten, insbesondere bei Erneuerbare-Energie-Anlagen? Wie lassen sich die Kosten senken?
- D. Wie können Strategien und Rahmenbedingungen, die eine Optimierung von Kreisläufen (z. B. im Bereich Energieinfrastruktur, E-Mobilität) ermöglichen, gestaltet werden?

- A. Wo ergeben sich größere Effizienzpotenziale bei der Verwertung bestehender Infrastrukturen? In welchem Verhältnis steht der Material- zum Energieeinsatz?

Heute liegen die anthropogenen Lager mancher Materialien bereits in der Größenordnung der Reserven in geogenen Lagerstätten vor (Graedel et al. 2004), wobei diese in urbanen Gebieten konzentriert sind (Kapur and Graedel 2006). Deshalb kann deren Rückgewinnung und Recycling in erheblichem Maße zur Steigerung der Ressourceneffizienz moderner Städte beitragen.

Das Recycling von Photovoltaik-Modulen wird für die Recyclingbranche aufgrund eines wachsenden Marktes und dem bevorstehenden Ablauf der Lebensdauer erster Module ab dem Jahr 2030 relevant. Daher steigt das Interesse für die fachgerechte Sammlung, Aufbereitung und Wiederverwertung der Module. Trotz bis dato geringer Erfahrungswerte zur Verwertung von PV-Modulen können erste Ansätze in Bezug auf den Material- und Energieeinsatz genannt werden. Derzeit werden die wenigen Module, die der Verwertung zugeführt werden, bei klassischen Abfallbehandlungsunternehmen abgegeben und großteils manuell bearbeitet. Da Glas und Rahmen einen hohen Gewichtsanteil ausmachen, wird auf diese Weise die geforderte Recyclingquote von 80 % erreicht. Eine Übererfüllung der Recyclingquote durch ein zusätzliches Recycling der Verkapselung wird erst stattfinden, wenn dies wirtschaftlich ist, sodass hier noch Effizienzpotentiale bestehen. Es ist aber davon auszugehen, dass durch erhöhte Rücklaufquoten der Module die Effizienz hinsichtlich Verwertung zunehmen wird. Durch vermehrtes Know-how kann eine effiziente Verwertungslogistik mittels (teil)automatisierter Verfahrensschritte sowie neuer Geschäftsmodelle entstehen.

Der (integrierte) Rückbau von alten / stillgelegten Leitungen stellt eine potenzielle Sekundärrohstoffgewinnung (v.a. Metalle, Kunststoffe) dar, welcher zu hohen ökologischen Einsparungen führen kann (bezogen auf „globale Erwärmung“, oder „kumulierter Primärenergieaufwand“). Ausschlaggebend dafür ist der umwelt- und ressourcenschonende Substitutionseffekt der rückgewonnenen Sekundärrohstoffe, welche als Ersatz für Primärrohstoffe herangezogen werden können. Die Menge an rückgewonnenen Sekundärrohstoffen kann dabei den Materialeinsatz von neuen Leitungsanlagen bei weitem übertreffen, da die neu eingebauten Leitungen oftmals leichtere oder vereinfachte Zusammensetzungen aufweisen. Beachtet man jedoch den abiotischen Ressourcenabbau von unterschiedlichen Umbauvarianten (vgl. Fallstudie „Straßenbahnbezirk“) wird ersichtlich, dass je nach Größe des betroffenen Netzwerkabschnittes, Umbauvarianten ohne Rückbau von alten/ stillgelegten Leitungen einen geringeren abiotischen Ressourcenabbau aufweisen, als komplexere Rückbauvarianten. Dies ist jedoch auf den Umstand zurückzuführen, dass das Substitutionspotenzial von Sekundärmetallen in dieser Wirkungskategorie relativ klein ist, und somit nur zu geringen Einsparungen durch die Verwertung von Sekundärrohstoffen führen kann.

Im Gebäudebereich stellen besonders Hochbauten aufgrund der akkumulierten Materialmenge und dem relativ hohen Anteil von Wertstoffen ein relevantes Ressourcenpotential dar, dessen effiziente und nachhaltige Bewirtschaftung einen wesentlichen Beitrag zur Schonung von Rohstoffen und Energie leisten kann. Die größten Effizienzpotentiale in Bezug auf die Bewirtschaftung von Althochbauten bestehen in der Weiternutzung von Bauwerken und Bauteilen. Durch die Verlängerung der Lebensdauer von Gebäuden, Bauwerksteilen und Bauprodukten werden die größten Effekte hinsichtlich der Schonung von Umwelt und Ressourcen erzielt. Wenn eine Weiternutzung bzw. Wiederverwendung nicht möglich bzw. nicht sinnvoll ist, sollten Baumaterialien zielorientiert verwertet werden. Dafür sind möglichst sortenreine Abfallströme (durch wertorientierte Rückbaustrategien) zu erzeugen. Diese Abfallströme sind einer Aufbereitung und Behandlung zuzuführen und schließlich mit hoher Effizienz zu hochwertigen Produkten zu verwerten. Schadstoffe und aus technischen und/oder ökonomischen Gründen nicht verwertbare Materialien sind aus dem Produktkreislauf auszuschleusen und geeigneten Senken zuzuführen. In Bezug auf die Bewirtschaftung von Altgebäuden ist der Materialeinsatz von vordergründiger Bedeutung gegenüber dem Energieeinsatz. Aufgrund der großen Materialmengen, die in Bauwerken akkumuliert wurden, bewirkt die effiziente Nutzung von Altgebäuden vor allem eine Reduktion des Verbrauchs an Primärrohstoffen, wodurch sowohl Material als auch Energie (zur alternativen Bereitstellung der Rohstoffe bzw.

Produkte) eingespart werden. So ergeben sich beispielsweise für die unterschiedlichen Bewirtschaftungsszenarien des Modell-Altgebäudes in Fallstudie 3 je nach Szenario 1,5 bis 8 Mal höhere Einsparungen in Bezug auf den Verbrauch abiotischer Rohstoffe als in Bezug auf den Verbrauch an Primärenergie (gemessen in Personenäquivalenten). Die große Bandbreite unterstreicht dabei den Einfluss der Rückbaustrategie auf den Beitrag, welchen Altgebäude zur Steigerung der Ressourceneffizienz beitragen.

B. Wie kann das Interesse einzelner Hersteller*innen bzw. der Industrie erhöht werden, die Rückgewinnung von Rohstoffen zu erhöhen? Welche Modelle, Konzepte oder Anreize gibt es?



Im Produktdesign sollte der Trend vom erhöhten Einsatz verschiedener Materialien zurückgefahren werden, sowie eine längere Lebensdauer von Produkten angestrebt werden (Graedel 2011). Ebenso sollten Produktdesigner*innen bereits bei der Entwicklung das EoL-Stadium des Produktes berücksichtigen (Lukschanderl 2011). In Anbetracht des vermehrten Einsatzes von kritischen Rohstoffen in bspw. PV-Anlagen (siehe Liste der Europäischen Union) und der damit verbundenen Relevanz für Hersteller*innen, sollte die Planung der Rückgewinnung von ebensolchen Rohstoffen gewiss sein.

Hersteller*innen könnten vom Sekundärrohstoffeinsatz in der Produktion einerseits wirtschaftlich profitieren und andererseits ihrem Produkt ein positiveres Image verleihen. Im Bereich des Produktdesigns existieren mehrere Ansätze, die eine Optimierung auf einer bestimmten Stufe des Produktlebenszyklus zum Ziel haben. „Design-for-Environment (DfE)“ zielt auf eine ökologieorientierte Produktgestaltung ab und stellt ein Tool für Produktentwickler*innen dar, um kritische Umweltparameter von Produkten bereits während der Entwicklungsphase zu behandeln und deren negative Umweltauswirkungen zu minimieren. Letztlich kann die Rückgewinnung von Rohstoffen auch dadurch erhöht werden, indem durch gesetzliche Vorgaben die Recyclingrate der Module angehoben wird bzw. materialspezifische Recyclingrate eingeführt werden. Design-for-Recycling Maßnahmen dürfen die Lebensdauer der Module nicht verkürzen, um negative Auswirkungen auf die Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit zu vermeiden. Maßnahmen, die hinsichtlich des Recyclings der Module positiv zu bewerten sind, bspw. Verschraubungen anstatt Verklebungen, können zu einer Verkürzung der Lebensdauer führen. In Gesprächen mit Vertreter*innen der Abfallwirtschaft, als auch der PV-Branche wird großes Interesse hinsichtlich PV-Recycling bekundet, wengleich aktuell keine detaillierten Konzepte vorliegen. In diesem Zusammenhang wird meist auf den Gesetzgeber verwiesen, der klar und deutlich die Verwertung zu regeln hat bzw. wird auf erhöhte Rücklaufquoten gewartet, um Geschäftsmodelle zu entwickeln.

Die Durchführung von zukünftigen (integrierten) Rückbauprojekten von alten/stillgelegten Leitungen sollte anhand genereller Leitfäden erfolgen, um den entstehenden ökologischen Mehrwert aufzuzeigen. Netzbetreiber*innen sollten bewusst als Teil der Kreislaufwirtschaft gesehen werden, und hier eine wichtige Schnittstelle zwischen Produzent*innen und Abfallverwerter*innen einnehmen. Dieses Bewusstsein sollte durch politische Strategien gefördert werden, wobei primär Anreize geschaffen werden sollten, die - ohne staatliche Regelungen - eigenständig motivieren alte/stillgelegte Leitungen rückzugewinnen. Erste Anreize könnten hierbei durch die Schaffung einer verbesserten Sekundärrohstoffmarktlage ermöglicht werden. Dies könnte durch eine faire Preispolitik und gleichwertige Qualitätsansprüche erzielt werden. Derzeit unterliegen Sekundärrohstoffe im Wettbewerb mit billigen Primärrohstoffen, wobei dies auch dem Umstand zu Schulden ist, dass bei der

momentanen Preisgestaltung, die unterschiedlichen Umwelt- und Ressourceneinsparungen von Sekundärrohstoffen nicht miteinkalkuliert sind. Eine ökologisch ausgerichtete Preisgestaltung könnte somit auch zu einer erhöhten Rentabilität von Rückbauprojekten führen. Ebenso könnte durch gleichwertige Qualitätszertifikate sichergestellt werden, dass Sekundärrohstoffe besser in den Markt wiedereingeschleust werden. Da den niedrigen Erträgen aus dem Rückbau von Leitungen hohe Aufwendungen durch die notwendigen Aufgrabungstätigkeiten gegenüberstehen, sollten vermehrt Konzepte wie der integrierte Rückbau von Leitungen umgesetzt werden. Diese Rückbauvariante sieht vor, dass im Zuge des Aufgrabungsprojektes allen potenziell betroffenen Netzbetreiber*innen die Möglichkeit eingeräumt wird, eigene Umbauarbeiten im Verlauf der Baustelle zu tätigen. Dies hat zur Folge, dass die Kosten für die Aufgrabungstätigkeiten zwischen den einzelnen Netzbetreiber*innen aufgeteilt werden, und so zu beidseitigen Kosteneinsparnissen führen. Solche Projekte werden jedoch nur unter der Voraussetzung funktionieren, dass die Kommunikation verbessert wird. Hierfür ist die (Weiter-) Entwicklung eines interaktiven Leitungskatasters notwendig, welcher als Schnittstelle hin zur öffentlichen Verwaltung fungiert. Durch die Adaptierung des Leitungskatasters sollte die Kontaktaufnahme zwischen den Netzbetreiber*innen – unabhängig von der Größe des Bauvorhabens – erleichtert werden. Hierbei sollte auch die Aufzeichnung von Daten zu Leitungen verbessert werden, um so eine sichere Informationslage für zukünftige Rückbauprojekte zu gewähren. Dies setzt eine lückenlose Datenübermittlung zu Informationen wie der Leitungstiefe, -zusammensetzung, -anzahl und -aktivität voraus. Mit dieser Informationsgrundlage könnten auch zukünftige Urban Mining Potenziale besser geplant werden.

Die Nutzung des Ressourcenpotentials in Altgebäuden bedarf einer Ausrichtung des Rückbaues nach Gesichtspunkten der Weiternutzung, Wiederverwendung und gezielten Wert- und Schadstoffausbringung. Bisher werden Rückbauprojekte jedoch oft vor allem unter externen Gesichtspunkten geplant und durchgeführt, da für die handelnden Akteur*innen andere Aspekte (wie z.B. Zeitdruck, Kostendruck, Fokus auf Neubau, limitiertes Platzangebot, Genehmigungen) im Vordergrund standen und somit Ressourcenpotentiale nicht ausgeschöpft wurden. Die Recyclingbaustoffverordnung (BMLFUW 2016) stellt in diesem Zusammenhang einen wichtigen Schritt in Richtung integrierte Rückbauplanung und zielorientierte Verwertung von Baumaterialien dar. Darüber hinaus bedarf es jedoch zusätzlicher Anreize die einerseits eine Weiternutzung und Wiederverwendung von Bauwerken bzw. Bauteilen forcieren und andererseits den Einsatz von qualitätsgesicherten Recyclingbaustoffen vorantreiben. Dazu gehören die Berücksichtigung des wertorientierten Rückbaues bereits in der Ausschreibung von Abbruch- und Bauprojekten (integrierte Rückbauplanung), der Aufbau von Informationsplattformen, die sowohl Anfall als auch Bedarf von Bauteilen und -materialien berücksichtigen (z.B. aufbauend auf einen materiellen Gebäudepass), die Etablierung von Bauteilnetzwerken und hochwertigen Verwertungsketten, die Durchführung von Pilotprojekten zur Darstellung der ökonomischen und ökologischen Vorteile von Wiederverwendung und wertorientiertem Recycling innerhalb und außerhalb der Baubranche sowie die Vorgabe des Einsatzes von gebrauchten Bauteilen und/oder Recyclingbaustoffen in öffentlichen Ausschreibungen. Darüber hinaus können Zertifikate zum nachhaltigen Bauen Anreize für mehr Design für Recycling und Reuse sowie für den Einsatz von gebrauchten Bauteilen und Recyclingbaustoffen schaffen. Bei Großprojekten kann die Wiederverwendung von Altbauteilen und -produkten zudem die Akzeptanz

bei Anrainern und Betroffenen erhöhen, da durch den Wiedereinsatz von markanten Elementen des Altgebäudes eine oft positiv empfundene Kontinuität gewährleistet wird.

C. Welcher Mehraufwand (Energie, Kosten) entsteht bei der Herstellung recyclingfähiger Produkte und Komponenten, insbesondere bei Erneuerbare-Energie-Anlagen? Wie lassen sich die Kosten senken?



Die Begründung für städtischen Bergbau ist derzeit mehr ökologisch als finanziell (Krook et al. 2015). Das bedeutet, dass die Identifizierung relevanter Teilprozesse entlang des Produktlebenszyklus notwendig ist (Fehringer et al. 2014) und damit die Anerkennung der ökologischen Bedeutsamkeit von Urban Mining (Krook et al. 2015).

Der Einsatz von Sekundärrohstoffen spielt bislang in der Herstellung von PV-Modulen eine untergeordnete Rolle, sodass hinsichtlich Mehraufwand recyclingfähiger Produkte nur vorläufige Aussagen getätigt werden können. Wie von Expert*innen bestätigt, lassen sich beinahe alle Materialien entsprechend wiederaufbereiten, was in Abhängigkeit der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen auch tatsächlich gemacht wird. Die wirtschaftliche Darstellbarkeit wird v.a. durch die Kosten der Aufbereitung bzw. Behandlung des Moduls sowie der am Markt zu erzielenden Preise determiniert. Laut Expert*innenmeinungen ist zwar die Wiedergewinnung der geringen Mengenanteile an Silizium technisch möglich, aufgrund des derzeit geringen Silizium-Preises jedoch aus wirtschaftlicher Sicht nicht zielführend. Aufgrund bisher geringer Mengen an Altmodulen erfolgt das Recycling derzeit manuell, eine Automatisierung des Prozesses existiert noch nicht. Mit steigenden Mengen wird es jedoch zu einer verstärkten Automatisierung kommen. Entsorgungs- und Recyclingunternehmen sollten daher auf längerfristige Planung setzen. „Frontrunner“ könnten sich Wettbewerbsvorteile am PV-Recycling-Markt verschaffen. Aufgrund der schwierigen Prognostizierbarkeit der Entwicklung besteht allerdings die Gefahr von langen Amortisationszeiten und auch Sunk Costs, wenn die erwarteten Mengen ausbleiben.

Sofern die alten/ stillgelegten Leitungen im Zuge von integrierten Rückbauprojekten rückgewonnen werden, entsteht kein sonderlicher Mehraufwand. Vielmehr ist hier der positive Substitutionseffekt von Sekundärrohstoffen (z.B. Metalle, Kunststoffe) hervorzuheben, welcher zu einem beträchtlichen Ersatz von Primärrohstoffen führen kann. Insbesondere bei der Rückgewinnung von Aluminiumleitern zeigt sich ein massives Einsparungsverhalten. So überragen die Aufwendungen für die Produktion von Primäraluminium, die Verwertung von Sekundäraluminium bei weitem (um ca. das 17-fache). Dennoch sind integrierte Rückbauprojekte noch nicht in der Praxis angelangt. Diese könnten durch politische Unterstützung stärker angestrebt werden, und so zu geringen Projektkosten für die beteiligten Netzbetreiber*innen führen. Weiters könnten Bonusstufen für die erfolgreiche Rückgewinnung von alten/ stillgelegten Leitungen angedacht werden, für die je nach Projekt-/Aufgrabungsgröße finanzielle Förderungen ausgestellt werden.

Über den gesamten Lebenszyklus gesehen ist im Gebäudebereich grundsätzlich nicht von höheren Kosten durch die Gestaltung von Bauteilen oder Bauprodukten im Sinne des „Design-for-Reuse“ oder „Design-for-Recycling“ auszugehen. Entgegen des Trends hin zu Verbundbauteilen und Verbundmaterialien, gibt es inzwischen zahlreiche Lösungen, die auf gute Wartbarkeit, längere Haltbarkeit und Demontierbarkeit am Ende der Lebensdauer abzielen. Im Fassadenbereich werden Systeme angeboten, die leicht reparierbar und demontierbar sind und die daher eine längere Lebensdauer und bessere Verwertbarkeit erwarten lassen. Beispielsweise wird bei hinterlüfteten

Fassadenlösungen im Fertighausbereich im Vergleich zu den bisher üblichen Styroporplatten-Verbundfassaden von bis zu doppelt so langen Nutzungsdauern und damit auch von höherer Kosten- und Ressourceneffizienz ausgegangen. Die teilweise höheren Anschaffungskosten von modularen bzw. demontierbaren Systemen lassen sich durch Betriebs-, Wartungs-, und Entsorgungsverträge abfedern, die eine gewisse Garantie in Bezug auf die niedrigeren Kosten während der Nutzung und danach abgeben und somit eine Amortisierung der höheren Anschaffungskosten für den Bauherrn gewährleisten können.

D. Wie können Strategien und Rahmenbedingungen, die eine Optimierung von Kreisläufen (z. B. im Bereich Energieinfrastruktur, E-Mobilität) ermöglichen, gestaltet werden?



Anreize für Urban Mining Strategien und in weiterer Folge die Aufklärung der Gesellschaft in Bezug auf dessen Erfordernis und Potenzial sind notwendig. Ebenso sollte die Forschung in diesem Bereich stärker forciert werden, da diese den Grundstein für erfolgreiches Urban Mining legt. Vor allem ist ein Hauptaugenmerk auf eine stärkere Interaktion zwischen einzelnen Akteur*innen zu legen (Krook et al. 2013).

Die Recyclingquote von PV-Modulen wird durch das Recycling des Aluminiumrahmens sowie des Glases erreicht, sodass die Motivation bzw. Anreize für weitere Design-for-Recycling-Ansätze nicht gegeben sind. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, regulative Vorgaben zu entwerfen, die strengere Recyclingquoten, z.B. für einzelne Stoffe bzw. Komponenten für PV-Module vorsehen. Weiters können spezifische Design-for-Recycling-Vorgaben, z.B. Zerlegbarkeit, Vermeidung von Schadstoffen, Verwendung genormter Materialien für einzelne Komponenten für alle PV-Module, usw., gesetzt werden. Eine bundesweite Registrierung der verbauten PV-Anlagen nach Ort und Typ der verbauten Module ist empfehlenswert. Auf diese Weise ist transparent ersichtlich, mit welchen Recyclingmengen bzw. Sekundärrohstoffen zu rechnen ist. Zusätzlich sollten in diesem Register auch die Hersteller*innen und die Herkunft des verbauten PV-Moduls verzeichnet werden, um Rückschlüsse auf Lebensdauer und Bauart treffen zu können. Frei zugängliche Zerlegepläne für PV-Module sind ein weiterer Baustein zur effizienteren Gestaltung des Recyclingprozesses. Die genaue Angabe der Materialzusammensetzung der PV-Module gibt Aufschluss über den Wert der im Modul enthaltenen Sekundärrohstoffe und unterstützt die Wahl des passenden Recyclingverfahrens. Zusätzlich hilft die Kenntnis der Materialzusammensetzung im Umgang mit Schadstoffen.

Wie bereits angedeutet, sind es vor allem politisch-motivierte Rahmenbedingungen, die zu einer erhöhten Kreislaufwirtschaft führen. Dabei sollte in einem ersten Schritt die Kommunikation und der damit einhergehende Informationsaustausch zwischen den betroffenen Netzwerkpartner*innen verbessert werden. Dies könnte im Sinne der Kreislaufwirtschaft auch auf weitere Partner*innen aus Industrie und Entsorgung ausgedehnt werden. So ist nicht außer Acht zu lassen, dass bereits bei Produzent*innen von Leitungen wichtige Entscheidungen bezüglich der Kabeltechnik/ -zusammensetzung getroffen werden, welche wesentliche Auswirkungen auf den potenziellen Rückbau von Leitungen haben (z.B. „Kabel-X“ Technologie, Einbau von Schadstoffen). Weiters sollten Kabelverwertungsunternehmen besser einbezogen werden, da diese ebenso an einer verbesserten Sekundärrohstoffgewinnung interessiert sind. In Anbetracht dieser Kette an relevanten Partner*innen sollte zusätzlich zu der projektbezogenen Kommunikation zwischen Netzbetreiber*innen auch ein Konsortium aus allen potenziellen Partnern*innen einberufen werden, welches langfristige Urban Mining Ziele im Bereich der erdverlegten Infrastruktur festlegt. Der bundesweit verpflichtende

Rückbau von alten/ stillgelegten Leitungen könnte hierbei einen zentralen Ausgangspunkt darstellen, welcher jedoch auch finanzielle Bonusstufen je nach Projektgröße inkludieren könnte, um die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen positiv zu konnotieren.

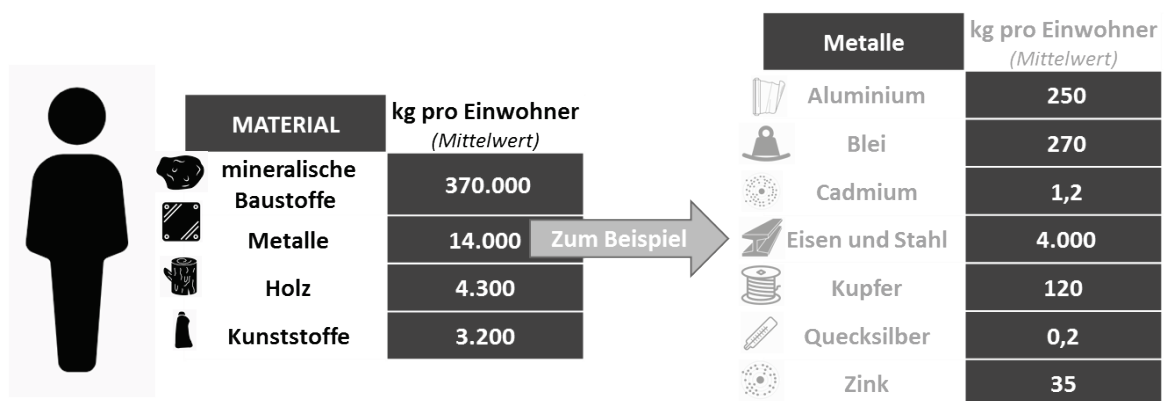
Die Grundlage für kreislauforientierte Bewirtschaftung des Gebäudeparks stellt einerseits die lebenszyklusorientierte Planung nach Ressourceneffizienzaspekten und andererseits die wertorientierte Gestaltung des Rückbaus dar. Strategien zur Optimierung von Kreisläufen umfassen Ansätze zur integralen Planung von Gebäuden (von Beginn an Rückbau mitdenken) inkl. der Berücksichtigung von Wiederverwendungs- und Recyclingaspekten in Ausschreibungen von Baumaßnahmen. Außerdem ist es wichtig, Daten- und Informationsplattformen wie Gebäudepässe sowie Bauteilbörsen und -verwertungsnetzwerke zu etablieren, die die wirtschaftliche Planbarkeit des Rückbaus nach Aspekten der Wiederverwendung und dem hochwertigen Recycling verbessern sollen. In diesem Sinn ist die Vorreiterrolle der öffentlichen Hand zu betonen. Es sind Anforderungen zu ressourceneffizientem Design sowie dem Einsatz von gebrauchten Bauteilen und Recyclingbaustoffen in öffentlichen Ausschreibungen festzulegen. Die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft im Gebäudebereich sollte digitale Technologien nutzen, die besonders zur Schaffung einer Informationsbasis zur Zusammenführung von Angebot (Bauteile, Materialien) und Nachfrage (Verwertungspfade, Einsatzmöglichkeiten) einen wertvollen Beitrag leisten können. Entsprechende Modelle könnten anhand von Leuchtturmprojekten entwickelt werden und später auf breiter Basis (in Zusammenarbeit mit Initiativen und Netzwerken zum wertorientierten Rückbau von Gebäuden) umgesetzt werden.

4. Schlussfolgerungen

4.1 Anthropogenes Lager: Potenzial

Die Nutzung natürlicher Rohstoffe in langlebigen Produkten und Bauwerken führt dazu, dass sich in Städten enorme Materiallager aufgebaut haben. Für manche Materialien liegen diese „anthropogenen Lager“ bereits in der Größenordnung der Reserven (unter derzeitigen Bedingungen – rechtlich, wirtschaftlich, technisch – abbaubare Rohstoffvorkommen) in natürlichen Lagerstätten vor. Die gesamten anthropogenen Materialbestände können im Durchschnitt mit rund 400 Tonnen pro Einwohner*in abgeschätzt werden, wobei hier mengenmäßig eindeutig mineralische Baustoffe das Lager dominieren. Urban Mining ist die integrale Bewirtschaftung dieses anthropogenen Lagers mit dem Ziel, aus langlebigen Produkten, Gebäuden, Infrastrukturen und Ablagerungen Sekundärrohstoffe zu gewinnen.

Auch wenn die Größe der anthropogenen Materiallager bereits anhand zahlreicher Analysen untersucht wurde, besteht nach wie vor erheblicher Forschungsbedarf was die Charakterisierung dieser Materiallager in Bezug auf ihre Nutzbarkeit als Rohstoffquelle betrifft.



Abschätzung auf Basis von: Daxbeck et al. 2015; Fehring et al. 2014; Lukschanderl 2011; Müller et al. 2017; Rauch 2009; Reisinger et al. 2009; Van Beers und Graedel 2003
Grafiken basierend auf The Noun Project (2018); drien Coquet, Bakunetsu Kaito, Olena Panosovska, Universal Icons, Joel Wisneski, Iconfly, Montu Yadav, tin, Creaticca Creative Agency, Nook Fulloptio

Abbildung 64: Anthropogenes Lager in kg pro Einwohner*in abgeschätzt auf Basis des Literaturreviews; Grafik basierend auf The Noun Project (2018)

4.2 Fallstudien: Herausforderungen und Empfehlungen

Anhand der drei Fallstudien wurden mögliche Energie- und Ressourceneinsparungen durch die gezielte Nutzung und Verwertung städtischer Materiallager untersucht und der mögliche Beitrag zu Urban Mining analysiert. Zusammenfassend konnten folgende Herausforderungen und Empfehlungen abgeleitet werden (siehe Kapitel 4.2.2 bis 4.2.2).

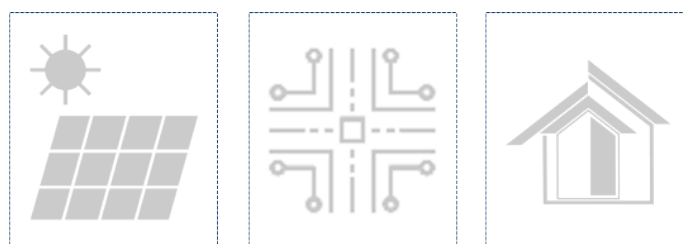


Abbildung 65: PV Anlagen, erdverlegte Leitungen und Gebäude (The Noun Project 2018).

4.2.1 Photovoltaik-Module

PV-Module werden für die Recyclingbranche aufgrund eines wachsenden Marktes und dem bevorstehenden Ablauf der Lebensdauer erster Module erst ab dem Jahr 2030 relevant. Dennoch gibt es vielerlei Maßnahmen, die bereits in naher Zukunft umgesetzt werden können und müssen, um ein optimales PV-Recycling in Österreich zu etablieren. Vor diesem Hintergrund können folgende Empfehlungen für die Umsetzung von Urban Mining-Strategien abgeleitet werden.

- Materialspezifische Recyclingquoten sind notwendig, da die Recyclingquoten gem. Elektroaltgeräte VO durch das Recycling des Aluminiumrahmens sowie des Glases schon erreicht werden.
- Umsetzung von „Design-for-Recycling-Maßnahmen“ für PV-Module sind notwendig.
 - Monomateriallösungen: Dies betrifft vor allem das Backsheet, das aus verschiedenen Kunststoffen besteht. Die Verwendung von nur einem Material (z.B. ein polyolefines, schmelz- und ablösbares Material) vereinfacht das Recycling.
 - Smarte, reversible Verklebungen: Zum Einsatz können sogenannte triggerbare Klebstoffe kommen. Anstatt der Verklebung bzw. Laminierung könnten Fluor-basierte Kunststoffe verwendet, die bereits entwickelt sind, aber noch nicht eingesetzt werden.
 - Verwendung von Kunststoffrahmen: Mit dem Ziel der Kostenreduktion wurden auch bereits Kunststoffrahmen für Solarthermie entwickelt. Diese Technik ist auch für PV-Module denkbar.
- Berücksichtigung der Zerlegbarkeit von PV-Modulen bei dem Design von PV-Modulen.
- Design-for-Recycling-Maßnahmen dürfen die Lebensdauer der PV-Module nicht verkürzen.
- Erstellung eines bundesweiten Katasters verbauter PV-Anlagen nach Ort und Typ ist empfehlenswert.
- Entsorgungs- und Recyclingunternehmen sollten auf längerfristige Planung setzen, um sich als „Frontrunner“ Wettbewerbsvorteile am PV-Recycling-Markt zu verschaffen.

4.2.2 Infrastruktur

Erdverlegte Leitungen bzw. Kabel sind durch ihre unterirdische Lage hinsichtlich Materialrückgewinnung erschweren Rahmenbedingungen ausgesetzt. So führen auch nur kleine Aufgrabungstätigkeiten in der Regel zu Verkehrsbehinderungen. Insbesondere Leitungsarbeiten innerhalb des Stadtgebietes sind mit enormen Aufwendungen (Planung, Durchführung) verbunden. Die lebenszyklusorientierte Bewirtschaftung und der integrierte Rückbau (z.B. gemeinsam mit Einbaumaßnahmen) stellt eine Chance zur Rückgewinnung von Rohstoffen (v.a. Aluminium und Kupfer) aus stillgelegten Leitungen dar.

- Der ökologische Mehrwert der Rückgewinnung von Alt-Leitungen - durch die Schonung von Umwelt und Ressourcen - sollte bei der Durchführung von zukünftigen (integrierten) Rückbauprojekten miteinbezogen werden. Der positive Effekt durch die Substitution durch Primärrohstoffe (Metalle, Kunststoffe) ist dabei ausschlaggebend.
- Anreize für Netzbetreiber*innen um eigenständig alte/ stillgelegte Leitungen rückzugewinnen sollten geschaffen werden, wie z.B. Abnahmeverträge (zu stabilen Preisen) mit Sekundärrohstoffhändlern.

- Integrierte Rückbauvarianten sollten beworben sowie rechtlich (Haftung) und organisatorisch vereinfacht werden, da hierbei die hohen Aufgrabungskosten unter den Beteiligten aufgeteilt werden können, was die Rentabilität steigert.
- Die (Weiter-)Entwicklung eines interaktiven Leitungskatasters könnte das Baustellenmanagement – unabhängig von der Größe des Bauvorhabens – deutlich erleichtern und die Kommunikation zwischen den Netzbetreiber*innen verbessern.
- Vorschriften, die eine Verpflichtung zum Rückbau von alten/ stillgelegten Leitungen bei Aufgrabungen, sowie eine gegebenenfalls notwendige Feststellung der Netzbetreiber*innen bei unbekanntem, alten Leitungen, sollten etabliert werden.
- Forschung in organisatorische und technische Verfahren die eine ökonomisch und ökologisch vorteilhafte Bewirtschaftung von Untergrundinfrastrukturen ermöglichen (z.B. grabenlose Austauschverfahren, Infrastruktur-Kanäle (mehrere Einbauten in einem Linienelement), automatisierte Baustellenplanung und -management zwischen den Einbautenträgern) ist notwendig.

4.2.3 Hochbau

Hochbauten stellen aufgrund der akkumulierten Materialmenge und dem hohen Anteil von Wertstoffen ein relevantes Ressourcenpotential dar, dessen effiziente und nachhaltige Bewirtschaftung am Nutzungsende einen wesentlichen Beitrag zur Schonung von Rohstoffen und Energie leisten kann. Den größten Beitrag leisten dabei Maßnahmen zur Erhaltung und Weiternutzung von Bauwerk(steil)en sowie die Wiederverwendung von Bauteilen. Generell ist besonders eine wertorientierte Rückbauplanung und sorgfältige Durchführung grundlegend für die hochwertige Nutzung und Verwertung von Baumaterialien.

- Die Grundlage für die ressourceneffiziente Nutzung von Bauteilen und Materialien in Altgebäuden stellt der Rückbau als Konzept zur Sanierung bzw. zum wertorientierten Abbau dar.
- Lebenszyklusüberlegungen sollten verpflichtend im Planungsprozess berücksichtigt werden und es sollte ein Fokus auf Rückbaufähigkeit und Demontierbarkeit von Baukonstruktionen gelegt werden.
- Leuchtturmprojekte sollten initiiert werden, um den Einsatz von Alt-Bauteilen und Recyclingbaustoffen zu illustrieren und/oder den Mehrwert rückbauorientierter Designs und recyclinggerechter Konstruktionen deutlich zu machen.
- In öffentlichen Ausschreibungen von Baumaßnahmen sollten gebrauchte Bauteile und/oder Recyclingbaustoffe besondere Berücksichtigung finden und wenn möglich dahingehend verpflichtende Einsatzvorgaben gemacht werden.
- Initiativen wie das „Baukarussell“ sind notwendig, um die Bündnisse und Netzwerke zwischen den klassischen Akteur*innen des Bausektors (Architekturbüros, Baufirmen usw.), abfallwirtschaftlichen Akteur*innen und sozioökonomischen Betrieben zu etablieren und dadurch Geschäftsmodelle für die ressourceneffiziente Bewirtschaftung von Altgebäuden aufzeigen.
- Über den gesamten Lebenszyklus gesehen, ist im Gebäudebereich nicht von höheren Kosten durch die Gestaltung von Bauteilen oder Bauprodukten im Sinne des „Design or Reuse“ oder „Design-for-Recycling“ auszugehen.

- Durch die Verlängerung der Lebensdauer von Gebäuden, Bauwerksteilen und Bauprodukten werden die größten Effekte hinsichtlich der Schonung von Umwelt und Ressourcen erzielt.

4.3 Urban Mining: Herausforderungen und Empfehlungen

Äußere Faktoren wie die Rechtslage, Markt, Technologien etc. bestimmen die sich ständig verändernden Grenzen zwischen Ressourcen und Reserven und sind damit wichtige Treiber für die Umsetzung von Urban Mining Strategien zur Steigerung der Ressourceneffizienz auf städtischer Ebene. Politische Anreize für Urban Mining und in weiterer Folge die Aufklärung der Gesellschaft in Bezug auf dessen Erfordernis und Potenziale sind ebenso notwendig, wie die Forcierung der Forschung, da diese den Grundstein für erfolgreiches Urban Mining legen. Urban Mining beginnt bei der Erkundung des anthropogenen Lagers über die Bestimmung der Rückgewinnbarkeit bis hin zur Bewertung der rechtlichen, ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen. Als Begriff ist Urban Mining aktuell noch zu unklar definiert bzw. wird er selbst von Expert*innen zu wenig konkret angewandt. Es wird empfohlen, entweder eine Schärfung des öffentlichen Begriffsbilds zu forcieren oder bei Ausschreibungen (oder Ähnliches) konkret das gewünschte Teilgebiet anzusprechen.

Die skizzierte Vision (siehe Kapitel 3.3.4) beschreibt den wünschenswerten Zustand in Österreich im Jahr 2050 hinsichtlich Urban Mining. Gemäß dieser Vision decken Sekundärrohstoffe den allgemeinen Rohstoffbedarf im Jahr 2050 im maximalen Ausmaß, unter Maßgabe ökonomischer, ökologischer und sozialer Faktoren, wobei der Anteil am gesamten Rohstoffeinsatz mindestens 80 % beträgt. Im Jahr 2050 sind das Umweltbewusstsein und daher die Akzeptanz von Sekundärrohstoffen seitens der Bevölkerung sehr hoch. Nachhaltige und recycelbare Produkte werden allgemein präferiert. Um dieser Vision näher zu kommen, sind diverse Maßnahmen notwendig, die gemeinsam mit den Expertinnen und Experten bei einem Fahrplan-Workshop entwickelt wurden. Gemäß diesem Workshop sind die wichtigsten Maßnahmen alle systemischer oder regulatorischer Natur inkl. Maßnahmen der Datenerfassung bzw. zeigt keine der im Workshop gemeinschaftlich als wichtig eingestuften Maßnahmen einen technischen Entwicklungsbedarf auf. Die Expert*innen sind sich weitgehend einig, dass Datenerfassung und -wartung der Grundstein für Urban Mining sind. Fehlende Informationen zu Bestand und Abfallströmen verursachen die bestehende, mangelnde (Wieder-)Verwertbarkeit.

Ein Hauptaugenmerk ist auf eine stärkere Interaktion zwischen den einzelnen Akteur*innen zu legen, damit allgemeine Rahmenbedingungen und Informationen geschaffen werden und zur Verfügung stehen, um effizientes Urban Mining zu ermöglichen. Um Urban Mining Strategien zur Steigerung der Ressourceneffizienz auf städtischer Ebene umzusetzen, sind Gesetze, Normen, Standards, Förderungen, Verpflichtungen, Modelle, Konzepte etc. notwendig, die für alle Beteiligten gesellschaftliche Akzeptanz fördern und Rechtssicherheit schaffen.



Abbildung 66: Recht und Politik (The Noun Project 2018f)

- Verstärkte Promotion von Sekundärrohstoffen
 - Schaffung bzw. Ausbau der rechtlichen Basis für den Handel von Sekundärrohstoffen.

- Vereinheitlichung von Rechtsmaterien: „Umweltmaterialrecht“ anstatt der Trennung von „Chemikalien- und Produktrecht“ sowie „Abfallrecht“
- Vereinheitlichung der Regelungsanforderungen an Primär- und Sekundärprodukte
- Entwicklung von Strategien zur Steigerung des Sekundärrohstoffeinsatzes.
 - Gesetzlicher Mindesteinsatz von Sekundärrohstoffen (z.B. zur Vorbildwirkung bei öffentlichen Ausschreibungen)
 - Verpflichtung zum Einsatz von Recyclingbaustoffen und Nachweispflicht zur Notwendigkeit bei Einsatz von Primärrohstoffen – „comply or explain“ - (der Einsatz von Primärrohstoffe muss technisch und ökologisch gerechtfertigt werden).
 - Vergabe von Förderungen nach ökologischen Kriterien.
- Entwicklung eines Kriterienkatalogs zur Identifikation der größten Ressourcenverbraucher.
- Einführung des Vorsorgeprinzips, um einen abgesicherten Rückbau der anthropogenen Ressourcen zu gewährleisten.

Auch wenn die Größe der anthropogenen Materiallager bereits anhand zahlreicher Studien untersucht wurde, besteht nach wie vor erheblicher Forschungsbedarf was die Charakterisierung dieser Materiallager in Bezug auf ihre Nutzbarkeit als Rohstoffquellen betrifft. Um eine breite Basis für die zukünftige Gestaltung der Umweltpolitik (und auch Urban Mining) zu erhalten, muss die quantitative Betrachtung durch qualitative Informationen, sowie durch zusätzliche Beurteilungshilfen ergänzt werden. Urban und Landfill Mining zeigen ein hohes Potenzial und dafür sind angewandte Lösungen notwendig, um Methoden und Technologien zu entwickeln, die sich auch in der Praxis bewähren. Laufende F&E-Tätigkeiten sind notwendig, um mit Marktentwicklungen Schritt halten zu können.

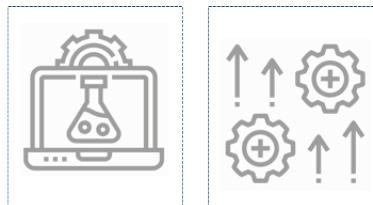


Abbildung 67: Forschung und Entwicklung (The Noun Project 2018c)

- Entwicklung und Durchführung von Ausbildungsinitiativen im Bereich „Urban Mining“.
- Sensibilisierung der Konsument*innen
 - der Einsatz von Sekundärrohstoffen muss als positives Kaufkriterium dienen.
- Schaffung eines Ressourcenkatasters, welcher Materialbestände nach Art, Menge und Nutzungszustand verorten würde, um räumliche Ressourcendaten zu erfassen, zu analysieren und auszuwerten.
 - Erstellung digitaler Gebäude- und Infrastrukturmaterialinventare.
 - Etablierung eines Verzeichnisses und einer Verfügbarkeit anhand z.B. interaktiver GIS-Karten.
 - Erstellung von Datenbanken zur stofflichen und chemischen Zusammensetzung aller Güter, Produkte und Bestände.
 - Standardisierung von Safe-by-Design und Design-for-Recyclingkonzepten.
 - Nutzung bestehende Datenbestände (z.B. der Leitungskataster der MA28).

- Entwicklung und Anwendung von Robotik und künstlicher Intelligenz zur Bauteilerkennung, -ausbau und -charakterisierung.
- Nutzung von Building Information Modelling (BIM) zur Identifizierung und Verortung nutzbarer Ressourcen und Bauteile.
- Etablierung optimierter Produktdesigns
 - Förderung von Design-for-Reuse/Recycling, Recyclingfähigkeit wird zur Norm.
 - Erfindung und Verwendung von Materialformen, die eine hohe Produktleistung unterstützen und gleichzeitig ein hohes Recyclingpotenzial aufweisen.
 - Ausschleusung von Schadstoffe aus dem Produktkreislauf.
 - Vorgaben zu Produktdesign könnte im Anklang an die Europäische Ökodesign-Richtlinie passieren.
 - Zerlegepläne und Materialzusammensetzung müssen frei zugänglich sein um damit ein Baustein zur effizienteren Gestaltung des Recyclingprozesses darzustellen.
 - Im Produktdesign sollte der Trend vom erhöhten Einsatz verschiedener Materialien zurückgefahren werden, sowie eine längere Lebensdauer von Produkten angestrebt werden.
 - Produktdesigner*innen sollten bereits bei der Produktentwicklung das EoL Stadium berücksichtigen.

Für eine Umsetzung von Urban Mining Strategien in der Praxis sind neben rechtlichen, politischen und ökologischen auch ökonomische Rahmenbedingung als Motivatoren zu beachten. Daher gilt es die Frage zu beantworten, wann die Gewinnung anthropogener Lagerstätten wirtschaftlich in Betracht gezogen werden kann – dies ist vor allem hinsichtlich volatiler Rohstoffpreise von großer Bedeutung. Die wirtschaftliche Nutzung von Sekundärrohstoffen wird weiters durch Aufbereitungs- und Behandlungskosten eingeschränkt.



Abbildung 68: Ökonomie (The Noun Project 2018e)

- Berücksichtigung von Lebenszykluskosten, Umweltkosten bzw. grauer Energie als verpflichtendes Vergleichskriterium und Heranziehung von Umweltkosten in der Projektkalkulation
- Die finanzielle Vorsorge für anthropogene Lagerstätten könnte nach dem Modell des Altlastenbeitrages angedacht werden, um eine zukünftige Rückgewinnung und Verwertung sicherzustellen.
- Durch gesetzliche Bonussysteme könnte für Urban Mining Strategien ein ökonomischer Anreiz für z.B. Netzbetreiber*innen geschaffen werden.
- Etablierung und Vermarktung einer Rohstoff- und Bauteilbörse.
- Die klassische ökonomische Rentabilitätsbetrachtung sollte um ökologische Betrachtungsweisen (z.B. mittels Ökobilanzierung) erweitert werden.
 - Ökologieorientierte Steuerreform: Ressourcensteuer und Internalisierung von Umweltkosten.

- Darstellung der Lebenszykluskosten, grauen Energie sowie Umweltkosten als Ausgangsbasis für die Vergabe von Bauleistungen.
- Eine faire Preisgestaltung für Primär- und Sekundärrohstoffe – bei gleichwertiger Qualität – würde die Wettbewerbsbedingungen für Sekundärrohstoffe verbessern und damit zu einer höheren Rentabilität von Sekundärrohstoffen führen.

5. Ausblick und Empfehlungen

Die Nutzung primärer Rohstoffe in langlebigen Produkten und Bauwerken führt dazu, dass sich in unseren Städten enorme Materiallager aufgebaut haben. Für manche Materialien liegen diese „anthropogenen Lager“ bereits in der Größenordnung der Reserven (= unter derzeitigen Bedingungen abbaubare Rohstoffvorkommen) in natürlichen Lagerstätten vor. In den vorherigen Kapiteln wurde der potentielle Beitrag von urbanen Lagerstätten zur Ressourceneffizienz moderner Städte untersucht. Auf Basis einer ausführlichen Literaturstudie, von drei Fallstudien sowie der Einbindung von Stakeholder*innen wurden Empfehlungen zur Umsetzung von Urban Mining Strategien abgeleitet, welche im Detail in den Schlussfolgerungen beschrieben wurden. Ein Hauptaugenmerk ist auf eine stärkere Interaktion zwischen einzelnen Akteur*innen zu legen, um allgemein akzeptierte Randbedingungen für Urban Mining zu schaffen und grundlegende Informationen für den „Abbau“ anthropogene Ressourcen zur Verfügung zu stellen. Für konkrete Strategien zur Steigerung der Ressourceneffizienz sind rechtliche Rahmenbedingungen notwendig, die für alle Beteiligten gesellschaftliche Akzeptanz fördern aber vor allem auch Rechtssicherheit schaffen (z.B. Abfallende, Haftungsfragen). Neben rechtlichen bzw. politischen, sind auch ökologische und ökonomische Rahmenbedingungen als weitere Motivatoren zu nennen. Aufgrund volatiler Rohstoffpreise und vor allem aufgrund der Konkurrenz zu Primärrohstoffen sollte eine Betrachtung entlang der gesamten Wertschöpfungskette erfolgen (Lebenszykluskosten, Umweltkosten, graue Energie etc.) bzw. als verpflichtendes Vergleichskriterium bei Projektkalkulationen und -vergaben herangezogen werden.

Auch wenn die Größe der anthropogenen Materiallager bereits anhand einiger Studien untersucht wurde, besteht nach wie vor erheblicher Forschungsbedarf was die Charakterisierung dieser Materiallager in Bezug auf ihre Nutzbarkeit als Rohstoffquelle betrifft. Um eine breite Basis für die zukünftige Gestaltung der Umweltpolitik zu erhalten, muss die quantitative Betrachtung durch qualitative Informationen sowie durch zusätzliche Beurteilungshilfen (z.B. räumliche Verteilung) ergänzt werden. Urban und Landfill Mining zeigen ein hohes Ressourcenpotenzial, jedoch sind für die Nutzung noch angewandte Lösungen notwendig und damit die Entwicklung von Methoden und Technologien, die sich auch in der Praxis bewähren. Laufende F&E-Tätigkeiten sind wesentlich, um mit Marktentwicklungen (z.B. neue Produkte) Schritt zu halten. Auf Basis dieser Studie können folgende Forschungsfragen bzw. notwendige zukünftige Arbeiten abgeleitet werden:

- Etablierung von Organisationsstrukturen, die eine Vernetzung der Akteur*innen entlang der Wertschöpfungskette unterstützen (für z.B. alle Netzbetreiber erdverlegter Infrastrukturen).
- Entwicklung von Datenbanken, die das anthropogene Lager in Art und Menge des Rohstoffs verzeichnen sowie eine räumliche Verortung des „Vorkommens“ erlauben (z.B. Rohstoffkataster).
- Entwicklung von Konzepten zur modularen Bauweise von Gebäuden, um z.B. die Nutzungsdauer zu verlängern bzw. einzelne Module wiederzuverwenden.
- Entwicklung und Bewertung neuer Geschäftsmodelle für Wiederverwendung und Recycling von Sekundärrohstoffen (z.B. Methode zur Berücksichtigung der Lebenszykluskosten bei Projektkalkulationen – speziell bei öffentliche Ausschreibungen).
- Untersuchung einzelner Design-for-Recycling-Ansätze in Hinblick auf die Lebensdauer und die Auswirkungen auf den Betrieb- und Nutzungsphase (z.B. mittels Ökobilanzierung).

Die Fragen können im Zuge von Forschungsprojekten erarbeitet werden, wobei eine enge Zusammenarbeit mit den einzelnen Akteur*innen entlang der Wertschöpfungskette anzustreben ist.

6. Verzeichnisse

6.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Symbolbild Urban Mining (Droog 2018)	15
Abbildung 2: Projektstruktur.....	17
Abbildung 3: Workshop (The Noun Project 2018).....	19
Abbildung 4: Das Klassifikationssystem nach McKelvey ist der konzeptionelle Rahmen, um die Verfügbarkeit von Materialien in Lagern beurteilen zu können (Die Abbildung basiert auf McKelvey (1976) und ist vereinfacht in Kral et al. (2017) dargestellt)	21
Abbildung 5: Abfallhierarchie auf Basis von BMNT (2018)	22
Abbildung 6: Modell der Circular Economy (Institute 2018).....	22
Abbildung 7: Forschungsthemen zur Einteilung von Studien hinsichtlich der urbanen Widerstandsfähigkeit basierend auf Krook et al. (2013).....	25
Abbildung 8: Literatur Review: Fokus der Studien (n=29)	26
Abbildung 9: Das Recycling-Potenzial von Metallen in städtischen Beständen (Graedel 2011).....	27
Abbildung 10: Literatur Review: geographische Systemgrenzen der Studien (n=29).....	28
Abbildung 11: Karte stillgelegter Nieder- und Mittelspannungsstromkabel (dicke schwarze Linien) in der Innenstadt von Linköping (Krook et al. 2011).....	29
Abbildung 12: Kosten für die reine Kabel- und integrierte Rückgewinnung von stillgelegten Stromkabeln durch konventionelle Erdaushubarbeiten bei unterschiedlichen Oberflächenmaterialien und Standorten (Krook et al. 2015).....	29
Abbildung 13: Anthropogenes Lager (Abschätzung in kg pro Einwohner je Material) (eigene Darstellung).....	31
Abbildung 14: Globales Abfallaufkommen aus PV-Paneelen 2016-2050 (Weckend et al. 2016)	35
Abbildung 15: Entwicklung der PV-Technologien in Österreich bis 2016 (Biermayr et al. 2016)	35
Abbildung 16: Grundsätzlicher Aufbau eines kristallinen Siliziummoduls (Accurec 2013).....	36
Abbildung 17: Entwicklung der installierten PV-Leistung weltweit bis 2016 (eigene Darstellung auf Basis von REN21 (2017)	41
Abbildung 18: Entwicklung der installierten PV-Leistung in Österreich bis 2016 (eigene Darstellung auf Basis von Biermayr et al. (2017))	42
Abbildung 19: Mögliche Sammelbehälter für PV-Altmodule (Fiedler 2016).....	45
Abbildung 20: Übersicht über bisher erprobte Recyclingverfahren für PV-Module (eigene Darstellung auf Basis von Fiedler (2016)).....	46
Abbildung 21: Prozessschema zum PV-Recycling (Green Jobs Austria 2013)	47
Abbildung 22: Entwicklung der verwendeten Materialien für die Herstellung von PV-Modulen bis 2030 (Weckend et al. 2016)	53
Abbildung 23: Entwicklung des Rohstoffpreises für Polysilizium (Forniés et al. 2016).....	54
Abbildung 24: Design-for-X Ansätze (eigene Darstellung).....	56
Abbildung 25: BAU-Szenario: zu erwartende installierte PV-Leistung und PV-Abfall bis 2075.....	61
Abbildung 26: Szenario Roadmap 2050: zu erwartende installierte PV-Leistung und PV-Abfall bis 2075	62
Abbildung 27: Grafik zu erdverlegte Leitungen (Tatwort/Fredmansky 2014)	69
Abbildung 28: Verlegte Erdkabel (TU Wien)	70
Abbildung 29: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Varianten zur Bewertung der Fallstudie "Straßenbahnbezirk" in Bezug auf die Rückgewinnung von verbauten Kabeln.....	73
Abbildung 30: Schematische Darstellung der Modelltrasse	78
Abbildung 31: Beitrag der Varianten zur globalen Erwärmung (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)	81
Abbildung 32: Beitrag der Varianten zum Abbau abiotischer Ressourcen (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)	81

Abbildung 33 Kumulierter Primärenergiebedarf der Varianten (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)	82
Abbildung 34: Vergleich der Varianten-Ergebnisse für die unterschiedlichen Wirkungskategorien ausgedrückt in Personenäquivalenten (=entspricht dem Ressourcenverbrauch bzw. der Umweltbelastung einer durchschnittlichen globalen Person)	84
Abbildung 35: Beitrag der Modelltrassen (mit 1 Kabel) zur globalen Erwärmung, Tiefe: 0,8m (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)	86
Abbildung 36 Beitrag der Modelltrassen (mit 4 Kabel) zur globalen Erwärmung, Tiefe: 0,8m (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)	86
Abbildung 37: Beitrag der Modelltrassen (mit 1 Kabel) zum Abbau abiotischer Ressourcen, Tiefe: 0,8m (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)	87
Abbildung 38: Beitrag der Modelltrassen (mit 4 Kabel) zum Abbau abiotischer Ressourcen, Tiefe: 0,8m (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)	88
Abbildung 39: Beitrag der Modelltrassen (mit 1 oder 4 Kabel bzw. Asphalt oder Grünfläche) zur globalen Erwärmung in Abhängigkeit von der Künettentiefe	89
Abbildung 40: Baustelle 1: Ist-/Plan-Zustand der erhobenen Aufgrabung im Vergleich zu den dZLK Daten der MA28	90
Abbildung 41: Baustelle 2: Ist-/Plan-Zustand der erhobenen Aufgrabung im Vergleich zu den dZLK Daten der MA28	92
Abbildung 42: Baustelle 3 - Bereich 1: Ist-/Plan-Zustand der erhobenen Aufgrabung im Vergleich zu den dZLK Daten der MA28	93
Abbildung 43: Baustelle 3 - Bereich 2: Ist-/Plan-Zustand der erhobenen Aufgrabung im Vergleich zu den dZLK Daten der MA28	94
Abbildung 44: Baustelle 4: Ist-/Plan-Zustand der erhobenen Aufgrabung im Vergleich zu den dZLK Daten der MA28	94
Abbildung 45: Baustelle 5: Ist-/Plan-Zustand der erhobenen Aufgrabung im Vergleich zu den dZLK Daten der MA28	95
Abbildung 46: Materialbilanz für den Bausektor in Österreich im Jahr 2015. Eigene Berechnungen basierend auf (Daxbeck et al. 2009, Cullen et al. 2012, BMLFUW 2015, Kleemann et al. 2016, BMNT 2017, Van Eygen et al. 2017). Werte sind auf eine signifikante Stelle gerundet	103
Abbildung 47: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Szenarien zur Bewertung des Effektes unterschiedlicher Maßnahmen (Kernsanierung vs. Abbruch und Neubau) im Rahmen der Fallstudie	105
Abbildung 48: Stahlbetonkonstruktion des entkernten Bestandsgebäudes auf dem Areal des Franz-Josefs-Bahnhofs in Wien (Foto: Kleemann 2017)	106
Abbildung 49: Materialflüsse des Vordergrund-Systems im Rahmen von Szenario 1B (Entkernung und Erhaltung des Tragwerkes) inkl. der jeweiligen Verwertungs- und Entsorgungspfade	109
Abbildung 50: Materialbilanz in Tonnen für Szenario 1A: Entkernung mit niedriger Trennschärfe und Erhaltung des Tragwerkes	112
Abbildung 51: Materialbilanz in Tonnen für Szenario 1B: Entkernung mit hoher Trennschärfe und Erhaltung des Tragwerkes	113
Abbildung 52: Materialbilanz in Tonnen für Szenario 2AA: Abbruch mit niedriger Trennschärfe und Neubau eines identischen Tragwerkes	114
Abbildung 53: Materialbilanz in Tonnen für Szenario 2AB: Abbruch mit niedriger Trennschärfe und moderner Neubau des Tragwerkes	114
Abbildung 54: Materialbilanz in Tonnen für Szenario 2BA: Rückbau mit hoher Trennschärfe und Neubau eines identischen Tragwerkes	114
Abbildung 55: Materialbilanz in Tonnen für Szenario 2BB: Rückbau mit hoher Trennschärfe und Neubau eines modernen Tragwerkes	115
Abbildung 56: Beitrag zur globalen Erwärmung durch die Nutzung von einer Tonne Stahlbeton für die einzelnen Lebenszyklusphasen eines Gebäudes (Daten aus (BBR 2018) und (Ecoinvent Association 2017))	115
Abbildung 57: Beitrag der Szenarien zur globalen Erwärmung (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)	116

Abbildung 58: Beitrag der Szenarien zum Abbau abiotischer Ressourcen (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)	117
Abbildung 59: Kumulierter Primärenergiebedarf der Bewirtschaftungsszenarien (schwarze Raute repräsentiert das Netto-Ergebnis)	118
Abbildung 60: Vergleich der Szenario-Ergebnisse für die unterschiedlichen Wirkungskategorien ausgedrückt in Personenäquivalenten (=entspricht dem Ressourcenverbrauch bzw. der Umweltbelastung einer durchschnittlichen globalen Person)	118
Abbildung 61: Phasen des wertorientierten Rückbaus unter besonderer Berücksichtigung der Wiederverwendung nach (Meissner et al. 2018).....	124
Abbildung 62: Vision Urban Mining im Jahr 2050 (Quelle: Energieinstitut an der JKU Linz)	134
Abbildung 63: Maßnahmen zur Erreichung der „Urban Mining Vision 2050“	140
Abbildung 64: Anthropogenes Lager in kg pro Einwohner*in abgeschätzt auf Basis des Literaturreviews; Grafik basierend auf The Noun Project (2018)	148
Abbildung 65: PV Anlagen, erdverlegte Leitungen und Gebäude (The Noun Project 2018).	148
Abbildung 66: Recht und Politik (The Noun Project 2018f)	151
Abbildung 67: Forschung und Entwicklung (The Noun Project 2018c).....	152
Abbildung 68: Ökonomie (The Noun Project 2018e).....	153

6.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kriterien zur Analyse der Literatur (Studien, Berichte, wissenschaftliche Artikel) zu Urban Mining... 23	23
Tabelle 2: Literatur Review: Überblick der gesichteten Studien/Projekte (n=29)	24
Tabelle 3: Literatur Review: Definition des Begriffs Urban Mining (n=29)	25
Tabelle 4: Marktanteil von PV-Modulen nach Technologiegruppe (2014-2030) (Weckend et al. 2016).....	36
Tabelle 5: Outputfraktion – PV-Modulkomponenten und Verwertungsmöglichkeiten (Fiedler 2016)	37
Tabelle 6: Materialzusammensetzung von PV-Modulen nach Modultechnologie (BINE 2010)	37
Tabelle 7: Merkmale von Verfahrenstypen zur Behandlung von PV-Modulen (Green Jobs Austria 2013)	48
Tabelle 8: Übersicht über in der Vergangenheit erforschte/erprobte Verfahrensoptionen für das Recycling von PV-Modulen (Green Jobs Austria 2013).....	49
Tabelle 9: Beispielhafte Übersicht über Unternehmen und Vereinigungen die PV-Recycling betreiben bzw. Altmodule sammeln (Green Jobs Austria 2013)	52
Tabelle 10: Erklärungen zu den selektierten Prozessen der ökologischen Bewertung.....	75
Tabelle 11: Beschreibung der selektierten Baustellen.....	79
Tabelle 12: Sensitivitätsanalyse für die Ökobilanzdatensätze der einzelnen Eingangsgrößen der Prozesse "Metallrecycling" und "Neue Metalle". Die resultierenden Differenzen ($\pm \Delta$) sind in % dargestellt.	85
Tabelle 13: Spezifische Materialintensitäten des Modellaltgebäudes basierend auf Daten zum Bestandsgebäude (Beton und Stahl im Tragwerk) und Daten zur Zusammensetzung von mehrstöckigen Wohngebäuden mit Stahlbeton-Tragwerk in Wien (vgl. (Kleemann et al. 2018), Wohngebäude ab 1997)	107
Tabelle 14: Spezifische Materialintensitäten des Tragwerks von modernen mehrstöckigen Wohngebäuden mit Stahlbeton-Tragwerk in Wien (basierend auf Kleemann et al. 2018, Wohngebäude ab 1997)	108
Tabelle 15: Trennschärfen der unterschiedlichen Entkernungs- bzw. Rückbauvarianten im Rahmen der Szenarien basierend auf Angaben zu selektivem Abbruch, Rückbau und Entkernung in (Clement et al. 2010)... 109	109
Tabelle 16: Kritische Parameter für den Beitrag zur globalen Erwärmung der Szenarien 1A und 2AA aufgrund der Sensitivitätsanalyse (Monte Carlo Simulation und Regressionsanalyse zur Analyse des Beitrages einer Parametervariation zum Ergebnis)	121
Tabelle 17: Fahrplan zur Erreichung der „Vision 2050 für Urban Mining: Kategorie Forschung und Entwicklung	135
Tabelle 18: Fahrplan zur Erreichung der „Vision 2050 für Urban Mining: Kategorie Förderung, Steuern, Verpflichtungen	136

Tabelle 19: Fahrplan zur Erreichung der „Vision 2050 für Urban Mining: Kategorie Standardisierung und Normen	138
Tabelle 20: Fahrplan zur Erreichung der „Vision 2050 für Urban Mining: Kategorie weitere Maßnahmen.....	139
Tabelle 21: Literatur Review – detaillierte Auswertung 1/2	169
Tabelle 22: Literatur Review – detaillierte Auswertung 2/2	176
Tabelle 23: Angenommene Transportdistanzen im Rahmen der Fallstudie "Straßenbahnbezirk"	182
Tabelle 24: Ökobilanzdatensätze zur Ermittlung des Ressourcenverbrauches und der Umweltauswirkungen aufgrund von Aufwendungen und Gutschriften im Rahmen der Variantenvergleiche bzw. Modelltrassenvergleiche.....	182
Tabelle 25: Angenommene Transportdistanzen im Rahmen der Szenarien.....	183
Tabelle 26: Heizwerte und CO ₂ -Emissionsfaktoren (fossil) der betrachteten thermisch verwerteten Materialien (bezogen auf Feuchtmasse)	183
Tabelle 27: Wirkungsgrade der Verbrennungsanlagen für Strom und Wärme bezogen auf den Heizwert des Brennstoffs.....	184
Tabelle 28: Ökobilanzdatensätze zur Ermittlung des Ressourcenverbrauches und der Umweltauswirkungen aufgrund von Aufwendungen und Gutschriften im Rahmen der Bewirtschaftungsszenarien	184

6.3 Literaturverzeichnis

- Accurec (2013). "Company introduction. Präsentation auf der 3rd International Conference on PV Module Recycling in Rome 2013."
- Arranz, P., et al. (2012). Practical demonstrator "Design for recycling photovoltaic system". 2012 Electronics Goes Green 2012+, IEEE.
- Auer, A. (2015). "Photovoltaic module decommissioning and recycling in Europe and Japan."
- AWG (2002). Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft. BGBI. I Nr. 102/2002.
- Baccini, P., Ed. (1989). The Landfill - Reactor and Final Storage. Lecture Notes in Earth Sciences. Berlin Heidelberg New York, Springer-Verlag.
- Bauforum Stahl (2018). "Heizwerte." Retrieved 13.07.2018, 2018, from <https://www.bauforumstahl.de/upload/documents/brandschutz/.../Heizwertkunststoff.pdf>.
- BBR (2018). ÖKOBAUDAT - Informationsportal nachhaltiges Bauen. Berlin, Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat.
- Behrendt, S., et al. (2010). "Roadmap: ressourceneffiziente Photovoltaik 2020+; Arbeitspaket 9 des Projekts" Materialeffizienz und Ressourcenschonung"(MaRes)." "
- Berger, W., et al. (2010). "A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules." Resources, Conservation and Recycling **54**(10): 711-718.
- Biermayr et al. (2016). Innovative Energietechnologien in Österreich - Marktentwicklung 2015. Berichte aus Energie- und Umweltforschung Wien, BMVIT.
- Biermayr, P., et al. (2017). "Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung." Berichte aus Energie- und Umweltforschung **13**.
- Bilimoria, S. and N. Defrenne (2013). "The evolution of photovoltaic waste in Europe." Renewable Energy World **5**.
- BINE (2010). "BINE Informationsdienst." Retrieved 02.02.2018, from <http://www.bine.info/themen/publikation/recyclingvon-photovoltaik-modulen/>.
- BMLFUW (2011). Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2011. Wien, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- BMLFUW (2012). Ressourceneffizienz Aktionsplan (REAP): Wegweiser zur Schonung natürlicher Ressourcen. Wien, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft,.
- BMLFUW (2015). Holzströme in Österreich. Wien, BMLFUW.
- BMLFUW (2015). Ressourcennutzung in Österreich – Bericht 2015. Wien, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

- BMLFUW (2016). Recycling-Baustoffverordnung – RBV. BGBl. II Nr. 290/2016. U. u. W. B. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft. Wien.
- BMNT (2017). Bundesabfallwirtschaftsplan 2017 - Teil 1. Wien, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus.
- BMVIT (2017). Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2016. . Berichte aus Energie- und Umweltforschung Umweltforschung. Wien.
- Boltz, W. (2010). Marktbericht 2010. Nationaler bericht an die Europäische Kommission. Wien: 136-136.
- Brunner, P. H. (2001). "Materials Flow Analysis: Vision and Reality." Journal of Industrial Ecology **5**(2): 3-5.
- Brunner, P. H. (2011). "Urban Mining A Contribution to Reindustrializing the City." Journal of Industrial Ecology **15**(3): 339-341.
- Brunner, P. H. and H. Rechberger (2016). Handbook of Material Flow Analysis: For Environmental, Resource, and Waste Engineers Second Edition. Boca Raton, CRC Press.
- Choi, J. K. and V. Fthenakis (2010). "Economic feasibility of recycling photovoltaic modules: survey and model." Journal of Industrial Ecology **14**(6): 947-964.
- Clement, D., et al. (2010). Konzept zur nachhaltigen Nutzung von Baurestmassen basierend auf der thematischen Strategie für Abfallvermeidung und Abfallrecycling der EU - ACTION 6: Evaluierung des Stands der Technik und mittelfristiger Entwicklungsmöglichkeiten von selektivem Rückbau und Baurestmassenaufbereitung. Wien, Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, TU Wien.
- Cossu, R. and I. D. Williams (2015). "Urban mining: Concepts, terminology, challenges." Waste Management **45**: 1-3.
- Cullen, J. M., et al. (2012). "Mapping the Global Flow of Steel: From Steelmaking to End-Use Goods." Environmental Science & Technology **46**(24): 13048-13055.
- D'Adamo, I., et al. (2017). "Economic feasibility for recycling of waste crystalline silicon photovoltaic modules." International Journal of Photoenergy **2017**.
- Daxbeck, H., et al. (2015). "Das anthropogene Lager in der Steiermark–Entwicklung eines Urban Mining Katasters: Land Steiermark inklusive Fallstudie Graz." Projekt UMKAT–Endbericht.
- Daxbeck, H., et al. (2009). Methodology for mapping of physical stocks. FORWAST report, Resource Management Agency.
- Daxbeck, H., et al. (2018). Projekt Urban Flows. Entwicklung und Implementierung eines ökonomisch und ökologisch orientieren Ressourcenmanagements. AP4 - Fallstudien. (nicht veröffentlicht): 1-106.
- Daxbeck, H., et al. (2006). Beitrag der Abfallwirtschaft zum Kupferhaushalt Österreich. Wien, Ressourcen Management Agentur.
- Dechantsreiter, U., et al. (2015). Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.
- Droog (2018). Retrieved 16.10.2018, from <https://www.droog.com/project/urban-mining>.
- EAA (2013). Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry. Brüssel, European Aluminium Association.
- Ecoinvent Association (2017). Ecoinvent Database,. Dübendorf, Switzerland., Ecoinvent Association,.
- Eigenbauer, A. and W. Urbantschitsch (2017). Statistikbroschüre 2017. WISSEN. Wo immer man auf Zahlen zählen kann. Wien: 73-73.
- Elshkaki, A., et al. (2016). "Copper demand, supply, and associated energy use to 2050." Global Environmental Change **39**: 305-315.
- energetica Energietechnik GmbH (2013). "Qualität in der PV-Branche – warum Recycling ein sehr wichtiges Thema wird."
- Ertex-Solar (2018). telefonisches Experteninterview mit einem Vertreter von ertex-solar vom 24.04.2018.
- Europäische Parlament (2008). "Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien (Text von Bedeutung für den EWR)." 3-30.

- European Commission (2010). International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment. Luxembourg, European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability.
- European Commission (2015). Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft, Brussels.
- European Commission (2017). "Construction and Demolition Waste (CDW)." Retrieved 01.06.2017, 2017.
- Exner Trenntechnik (2018). "Photovoltaik." Retrieved 15.02., 2018, from <https://www.exner-trenntechnik.de/photovoltaik/>
- Fechner, H., et al. (2016). "Technologie-Roadmap für Photovoltaik in Österreich." Berichte aus Energie- und Umweltforschung.
- Fehringer, R., et al. (2014). "Schaffung von rechtlichen Potenzialen für Urban Mining im Abfallrecht."
- Fiedler, R. (2016). "Recycling von PV-Modulen SolarWorld AG." from https://crm.saena.de//sites/default/files/civicrm/persist/contribute/files/2_Fiedler_Solar_world_PV%20Modul%20Recycling.pdf.
- Fornies, E., et al. (2016). "Polysilicon vs. upgraded metallurgical-grade silicon (UMG-Si): Technology, quality and costs. Photovoltaic International. 31. 29-38. ."
- Gemis (2018). "Gemis datenbank v4.95." <http://iinas.org/gemis-download-121.html>.
- Giacchetta, G., et al. (2013). "Evaluation of the environmental benefits of new high value process for the management of the end of life of thin film photovoltaic modules." Journal of Cleaner Production **51**: 214-224.
- Graedel, T. E. (2011). "The prospects for urban mining." Bridge **41**(1): 43-50.
- Graedel, T. E., et al. (2004). "Multilevel Cycle of Anthropogenic Copper." Environmental Science & Technology **38**(4): 1242-1252.
- Green Jobs Austria (2013). Recycling von PV-Modulen. Hintergrundpapier zum Round Table 2013. Wien, green jobs Austria.
- Halbleiter (2018). Retrieved 21.07, 2018, from <https://www.halbleiter.org/waferherstellung/wafer/>
- Hischier, R. and B. Weidema (2010). Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. St. Gallen, Ecoinvent Association.
- Huisman, J., et al. (2016). ProSUM: Prospecting Secondary raw materials in the Urban mine and Mining wastes. Electronics Goes Green 2016+(EGG), 2016, IEEE.
- Huisman, J., et al. (2017). ProSUM Project Urban mine and Mining wastes - Final report.
- IBU (2016). Umweltproduktdeklaration (EPD): Unkaschierte ULTIMATEPlatten und Filze, SaintGobain ISOVER G+H AG. Berlin, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU).
- IEA (2014). Energy Technology Roadmaps – a guide to development and implementation. Paris, International Energy Agency.
- Interview (2018). "persönliches Expert*inneninterview vom 15.02.2018."
- Interview (2018). "Schriftliches (e-mail) Experteninterview vom 01.02.2018 bzw. 07.02.2018."
- IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press.
- IPCC (2013). Climate Change – Contribution to AR5, Intergovernmental Panel of Climate Change
- ISO 14040 (2006). Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.
- Jacobs, J. (1961). "The Death and Life of Great American Cities. New York: Random House."
- Jokic, G. and D. Dortmann (o.J). "Recycling von PV-Modulen/Recycling of PV modules. Zusammenfassung, REMONDIS Electrorecycling GmbH."
- Kabel X, D. G. (2018). Kabel-X Systeme & Vorteile.
- Kang, S., et al. (2012). "Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules." Renewable Energy **47**: 152-159.
- Kapur, A. and T. E. Graedel (2006). Copper mines above and below the ground, ACS Publications.

- Kim, Y. and J. Lee (2012). "Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent." Solar energy materials and solar cells **98**: 317-322.
- Kleemann, F. and J. Lederer (2017). Reduktion von Treibhausgasemissionen und Ressourcenverbrauch durch Gebäudesanierung am Beispiel Projekt Althan Park (ReTreGe-A). Wien, Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, Technische Universität Wien.
- Kleemann, F., et al. (2016). "GIS-based Analysis of Vienna's Material Stock in Buildings." Journal of Industrial Ecology: n/a-n/a.
- Kleemann, F., et al. (2017). "GIS-based analysis of Vienna's material stock in buildings." Journal of Industrial Ecology **21**(2): 368-380.
- Kleemann, F., et al. (2018). "Bewertung von Abfallströmen aus Gebäudeabbrüchen in Wien auf Grundlage von Bildmatching-basierter Veränderungsdetektion." Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft **70**(3): 138-146.
- Klimaaktiv Energieholz (2016). Heizwerte handleüblicher Energieholzsortimente. Wien, BMLFUW.
- Kral, U., et al. (2017). Der städtische Untergrund als Rohstoffmine? Wien, Technische Universität Wien, Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement.
- Krook, J. and L. Baas (2013). "Getting serious about mining the technosphere: a review of recent landfill mining and urban mining research." Journal of Cleaner Production **55**: 1-9.
- Krook, J., et al. (2011). "Urban mining: hibernating copper stocks in local power grids." Journal of Cleaner Production **19**(9-10): 1052-1056.
- Krook, J., et al. (2015). "Urban infrastructure mines: on the economic and environmental motives of cable recovery from subsurface power grids." Journal of Cleaner Production **104**: 353-363.
- Kushiya, K., et al. (2003). Development of recycling and reuse technologies for large-area Cu (InGa) Se/sub 2/-based thin-film modules. Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of 3rd World Conference on, IEEE.
- Laurent, A., et al. (2014). "Review of LCA studies of solid waste management systems – Part I: Lessons learned and perspectives." Waste Management **34**(3): 573-588.
- Laurent, A., et al. (2013). Deliverable 5.2: Normalisation factors for environmental, economic and socio-economic indicators. Copenhagen, Technical University of Denmark.
- LAVU AG (2018). Experteninformation der LAVU AG.
- Lederer, J., et al. (2016). "Prospecting and Exploring Anthropogenic Resource Deposits: The Case Study of Vienna's Subway Network." Journal of Industrial Ecology **20**(6): 1320-1333.
- Lederer, J., et al. (2014). "A framework for the evaluation of anthropogenic resources: the case study of phosphorus stocks in Austria." Journal of Cleaner Production **84**: 368-381.
- Lichtensteiger, T. and P. Baccini (2008). "Exploration of Urban Stocks." J. Environ. Eng. Manage. **18**(1): 41-48.
- LME (2018). Retrieved 03.10, 2018, from <https://www.lme.com/>.
- Loserchemie (2018). "Recycling von Photovoltaikabfall." Retrieved 2018, 15.02, from <http://www.loserchemie.de/de/kompetenzen/recycling-von-photovoltaikabfall>.
- Luidold et al. (2013). Kritische Rohstoffe für die Hochtechnologieanwendung in Österreich Berichte aus Energie- und Umweltforschung. Wien, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT).
- Lukschanderl, L. (2011). Urban Mining. Die Stadt als Bergwerk der Zukunft. Sind Mülldeponien die "Goldgruben" von morgen?
- MA 28 (2017). "Allgemeine Geschäftsbedingungen für Aufgrabungen und Wiederinstandsetzungen."
- Markova, S. and H. Rechberger (2011). Entwicklung eines Konzepts zur Förderung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen: Materieller Gebäudepass und Design for Recycling für das Bauwesen. Wien, Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, TU Wien.
- Marwede, M. and A. Reller (2012). "Future recycling flows of tellurium from cadmium telluride photovoltaic waste." Resources, Conservation and Recycling **69**: 35-49.
- McKelvey, V. (1973). "Mineral resource estimates and public policy." United States Mineral Resources: Geological Survey Professional Paper **820**: 9-19.

- McKelvey, V. (1976). "Principles of the Mineral Resources Classification System of the US Bureau of Mines and the US Geological Survey." Geological Survey Bulletin.
- Meissner, M., et al. (2018). BauKarussell - Social Urban Mining unter besonderer Berücksichtigung der Wiederverwendung. Wien, BauKarussell.
- Monier, V. and M. Hestin (2011). "Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the WEEE directive." Final Report: 6.
- Moser, et al. (2014). "F&E Fahrplan Energieeffizienz in der energieintensiven Industrie. Eine Studie im Auftrag des Klima- und Energiefonds, September 2014; Steinmüller, Moser, Leitner: F&E Fahrplan Energieeffizienz in der Textil- und Lebensmittelindustrie. Eine Studie im Auftrag des Klima- und Energiefonds, ."
- Müller, D. B. (2006). "Stock dynamics for forecasting material flows—Case study for housing in The Netherlands." Ecological Economics **59**(1): 142-156.
- Müller, F., et al. (2017). Urban Mining: Ressourcenschonung im Anthropozän. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt (D).
- Muth, C. J. (2017). "Britische Forscher ersetzen Blei durch Wismut in Perowskit-Zellen." Retrieved 05.09.2018, from <https://www.pv-magazine.de/2017/07/19/britische-forscher-ersetzen-blei-durch-wismut-in-perowskit-zellen/>.
- ÖNORM (2014). Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode. Wien, Austrian Standards. **ÖNORM B 3151**.
- Palisade Corporation (2016). @Risk, Palisade Corporation,: Risk Analysis using Monte Carlo Simulation.
- Pauliuk, S., et al. (2013). "Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries." Resources, Conservation and Recycling **71**: 22-30.
- Photovoltaik Austria (o.J.). "Roundtable PV 2013."
- PV Austria (2018). "Rechtliche Rahmenbedingungen." Retrieved 05.09.2018, from <https://www.pvaustria.at/meine-pv-anlage/rechtliche-rahmenbedingungen/>.
- PV Insight (2018). Retrieved 16.02, 2018, from <http://pvinsights.com>.
- PV Magazine (2018). Retrieved 16.02, 2018, from <https://www.pv-magazine.de/2016/06/20/photovoltaik-recycling-marktvolumen-von-mehr-als-15-milliarden-us-dollar-bis-2050>.
- Randacher, A. (2017). Erneuerungskonzept für die Energieversorgung der Wiener Straßenbahn. Untersuchung möglicher Umbauvarianten am beispiel Versorgungsbezirk Kaunitzgasse. (nicht veröffentlicht). Bad Ischl.
- Rasch, H. (2016). "Trübe Sonnensegel." Recycling Magazin **24**, 2016.
- Rauch, J. N. (2009). "Global mapping of Al, Cu, Fe, and Zn in-use stocks and in-ground resources." Proceedings of the National Academy of Sciences **106**(45): 18920-18925.
- RBV (2015). Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Pflichten bei Bau- oder Abbruchtätigkeiten, die Trennung und die Behandlung von bei Bau- oder Abbruchtätigkeiten anfallenden Abfällen, die Herstellung und das Abfallende von Recycling-Baustoffen (BGBl. II Nr. 181/2015).
- Reisinger, H., et al. (2014). Gebäudepass - Erarbeitung von Grundlagen für die Standardisierung von Gebäudepassen als Gebäudematerialinformationssystem. Wien, Umweltbundesamt.
- Reisinger, H., et al. (2009). "Lead, cadmium and mercury flow analysis—decision support for Austrian environmental policy." Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft **61**(5-6): 63-69.
- REN21 (2017). Renewables 2017 – Global Status Report.
- Renewableenergyfocus.com (2009). "End-of-life PV: then what? - Recycling solar PV panels." Retrieved 05.09.2018, from <http://www.renewableenergyfocus.com/view/3005/end-of-life-pv-then-what-recyclingsolar-pv-panels/>
- Salzburger, M. and H. Kabelverwertungs Ges.m.b (2001). KABEL. Bürmoos: 3-3.
- Sander, K., et al. (2013). Maßnahmen zur Optimierung der Entsorgung von Quecksilberhaltigen Gasentladungslampen und anderen Lampenarten. Hamburg, Ökopol GmbH.
- Saperatec (2018). Retrieved 15.02, 2018, from <https://www.saperatec.de/de/technologie.html>.
- Secondsol (2018). Retrieved 15.02, 2018, from <http://www.secondsol.de/index.htm>.

- Sic (2018). Retrieved 15.02, 2018, from <http://www.sic-processing-bautzen.de/de/standardleistungen>.
- Stark, W., et al. (2003). Management von Baurestmassen nach den Gesichtspunkten der optimalen Ressourcennutzung und des langfristigen Umweltschutzes anhand der Güter- und Stoffbilanz des „Bauwerks Österreich“. Wien, GUA Gesellschaft für umfassende Analysen GmbH.
- Steger, S. and R. Bleischwitz (2011). "Drivers for the use of materials across countries." *Journal of Cleaner Production* **19**(8): 816-826.
- Steger, S., et al. (2011). "Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen." *Ressourcen.Wupperinst.Org*: 252-252.
- Taetow, W. (2013). "Recycling von Photovoltaik-Modulen. PV Cycle".
- Tanikawa, H., et al. (2015). "The weight of society over time and space: A comprehensive account of the construction material stock of Japan, 1945–2010." *Journal of Industrial Ecology* **19**(5): 778-791.
- Tatwort/Fredmanky (2014). "Präsentationsunterlagen der Kampagne „VOR SORGEN für der Erhalt der Trink- und Abwassernetze“. Abgerufen von www.wasseraktiv.at/vorsorgen, am 27. Oktober 2014."
- The Noun Project (2018). "by Adi Kurniawan, Adrien Coquet, icongeek, Lance Hancock, Claire Jones." Retrieved 16.10.2018, from <https://thenounproject.com>
- The Noun Project (2018). "by Adrien Coquet, Bakunetsu Kaito, Olena Panasovska, Universal Icons, Joel Wisneski, Iconfly, Montu Yadav, tin, Creaticca Creative Agency, Nook Fulloption." Retrieved 16.10.2018, from <https://thenounproject.com>
- The Noun Project (2018). "by Florian B, ProSymbols, viergien angela." Retrieved 16.10.2018, from <https://thenounproject.com>
- Thomas, B. and F. McDougall (2005). "International expert group on life cycle assessment for integrated waste management." *Journal of Cleaner Production* **13**(3): 321-326.
- UFH (2018). "Photovoltaik - Photovoltaik entsorgen:." Retrieved 05.09.2018, from <https://www.ufh.at/elektroaltgeraete-leistungen/photovoltaik-entsorgen/>.
- UFH (2018). Telefonisches Experteninterview mit einer Vertreterin des UFH.
- Umweltbundesamt (2018). Energieverbrauch privater Haushalte. Dessau Umweltbundesamt (DE).
- Urban Mining (2018). "Urban Mining: about." 17.10.2018, from <https://urbanmining.at/about>.
- Van Beers, D. and T. Graedel (2003). "The magnitude and spatial distribution of in-use copper stocks in Cape Town, South Africa." *South African Journal of Science* **99**(1-2): 61-69.
- Van Beers, D. and T. Graedel (2007). "Spatial characterisation of multi-level in-use copper and zinc stocks in Australia." *Journal of Cleaner Production* **15**(8-9): 849-861.
- Van Eygen, E., et al. (2017). "Comprehensive analysis and quantification of national plastic flows: The case of Austria." *Resources, Conservation and Recycling* **117**: 183-194.
- Van Eygen, E., et al. (unter Begutachtung). "Integrating high-resolution material flow data into the environmental assessment of waste management system scenarios – the case of plastic packaging in Austria." *Environmental Science & Technology*.
- VDI (2012). "Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Berechnungsmethoden, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf."
- VinylPlus (2018). Progress Report 2017. Reporting on 2017 Activities: 36-36.
- Wallsten, B. (2015). The URK world: hibernating infrastructures and the quest for urban mining, Linköping University Electronic Press.
- Wallsten, B., et al. (2013). "To prospect an urban mine - Assessing the metal recovery potential of infrastructure cold spots in Norrköping, Sweden." *Journal of Cleaner Production* **55**: 103-111.
- Wallsten, B., et al. (2015). "The economic conditions for urban infrastructure mining: Using GIS to prospect hibernating copper stocks." *Resources, Conservation and Recycling* **103**: 85-97.
- Weckend, S., et al. (2016). End-of-life management: solar photovoltaic panels, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

- Weichbrodt, R. (2014). "Urban Mining-Strategien zur Nutzung der städtischen Rohstofflager." Müll und Abfall. Jg 46: 13-16.
- Winterstetter, A., et al. (2016). "Evaluation and classification of different types of anthropogenic resources: the cases of old landfills, obsolete computers and in-use wind turbines." Journal of Cleaner Production 133: 599-615.
- Winterstetter, A., et al. (2016). "Integrating anthropogenic material stocks and flows into a modern resource classification framework: Challenges and potentials." Journal of Cleaner Production 133: 1352-1362.
- Wittmer, D. (2006). Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt: ein methodischer Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten, vdf Hochschulverlag AG.
- Zeltner, C., et al. (1999). "Sustainable metal management exemplified by copper in the USA." Regional Environmental Change 1(1): 31-46.
- Zuser, A. and H. Rechberger (2011). "Considerations of resource availability in technology development strategies: The case study of photovoltaics." Resources, Conservation and Recycling 56(1): 56-65.

7. Anhang

7.1 Literatur Review

Tabelle 21: Literatur Review – detaillierte Auswertung 1/2

AUTOR*IN	AUFTRAG- GEBER*IN	TITEL	KURZBESCHREIBUNG	URB. MIN. DEFINITION	MOTIVATION UND ZIELE
(Kleemann und Lederer 2017)	6B47 Real Estate Investors AG	Reduktion von Treibhausgasemissionen und Ressourcenverbrauch durch Gebäudesanierung am Beispiel Projekt Althan Park (ReTreGe-A)	Variantenstudie: Entkernung versus Abriss und Neubau	ENG	Beurteilung eines ressourceneffizienten Umbaus
(Kral et al. 2017)	FFG (bmvit)	Der städtische Untergrund als Rohstoffmine? Potential an Sekundärressourcen in der erdverlegten Infrastruktur	Die Studie zeigt, dass das Betreiben/Erstellen eines Ressourcenkatasters für erdverlegte Ver- und Entsorgungsnetzwerke von Seiten der Betreiber machbar ist. Testregionen wurden recherchiert und bewertet, ob die Erstellung eines Ressourcenkatasters anhand der vorhandenen Daten machbar wäre.	ENG	Beurteilung der Machbarkeit eines Ressourcenkatasters für Sekundärrohstoffe
(Müller et al. 2017)	Umweltbundesamt (DE)	Urban Mining - Ressourcenschonung im Anthropozän	Ausführlicher Gesamtüberblick über Urban Mining: Definition, Aktuelle Daten, Strategien und Potenziale	ENG	Definition/ Erklärung von Urban Mining, Aktuelle Zahlen, Strategien und Potenziale
(Huisman et al. 2016)	Huisman, J. et al. (European Union's Horizon 2020)	ProSUM Project: Prospecting Secondary raw materials in the Urban mine and Mining wastes (Final Report)	Das Team des "ProSUM" Projektes entwickelte erstmalig eine frei zugängliche "Urban Mine Plattform" (UMP), auf welcher Daten zu den aktiven/stillgelegten Materialbeständen, Produktkompositionen, sowie Abfallströmen von Elektrogeräten, Batterien und Fahrzeugen, für alle 28 E.U. Mitgliedsstaaten, Norwegen und die Schweiz, abrufbar sind.	WEIT	Ziel des "ProSUM" Projektes war die Etablierung einer online Urban Mining Plattform, die für eine transparente und realistische Datenlage für Urban Mining sorgt. Damit sollte erkenntlich werden, wie sich der länderspezifische Konsum von Elektrogeräten/Batterien/Fahrzeugen zusammensetzt und welche Ressourcen daraus (zukünftig) resultieren, und somit Teil von Urban Mining Strategien werden könnten/sollten.

AUTOR*IN	AUFTRAG- GEBER*IN	TITEL	KURZBESCHREIBUNG	URB. MIN. DEFINITION	MOTIVATION UND ZIELE
(Kleemann et al. 2018)	Kleemann, F. et al.	Bewertung von Abfallströmen aus Gebäudeabbrüchen in Wien auf Grundlage von Bildmatching-basierter Veränderungsdetektion	Die Studie befasst sich mit der Entwicklung eines alternativen Berechnungsansatzes von Abbruchmaterialien/Abfallströmen aus dem Gebäudeabbau (anhand der Stadt Wien). Der Ansatz, der aus der Kombination aus Bildmatching-Analyse und Materialintensitäten („die Abschätzungen über Materialqualität und Menge ermöglichen) besteht, soll eine brauchbare Alternative zu den behördlichen Abbruchaktivitätsaufzeichnungen liefern.	WEIT	Die Motivation der Studie ist es einen Berechnungsansatz zu entwickeln, der eine genauere Darstellung der Abfallströme aus Gebäudeabbrüchen, im Vergleich zu städtischen, statistischen Aufzeichnungen zu Abbruchaktivitäten. Der neue Ansatz beruht auf der Kombination aus Bildmatching und Materialintensitäten jeweiliger Gebäudekategorien, und soll so genauere und aktueller Daten in Bezug auf Abbruchaktivitäten liefern. Weiters ist es dadurch möglich die Abbruchaktivitäten durch effektives Monitoring zu beobachten und so auch zukünftige Abfallströme prognostizieren zu können.
(Kleemann et al. 2017)	Kleemann, F. et al.	GIS-based Analysis of Vienna's Material Stock in Buildings	Darstellung der Materialkapazität anhand der Analyse der Gebäudestruktur und der dazugehörigen Materialintensität mithilfe von GIS-Daten anhand der Stadt Wien; Bottum-Up-Ansatz; Auswertung von Unsicherheiten und Datenlecks	ENG	Analyse des Gebäudebestandes des 20. Jahrhunderts mithilfe von GIS-Daten - somit erfolgreiche Kombination von verschiedenen Daten, mögliche Ausweitung für zukünftige Stadtentwicklung, Erkennen von Unsicherheiten und Berücksichtigung für zukünftige Projekte
(Elshkaki et al. 2016)	Elshaki, A. et al.	Copper demand, supply, and associated energy use to 2050	In Anlehnung an die "GEO-4" Szenarien der UN, wurden die globale Anfrage und Angebot von Kupfer szenarienbasiert analysiert um daraus politische Strategien zu ziehen. Die Ergebnisse zeigten, dass die zukünftige Kupfer-Nachfrage sowie der damit verbundene Energiebedarf, bei jedem Szenarium steigen wird.	WEIT	Szenariendarstellung/-berechnung bezüglich des globalen Kupferaufkommens, sowie der Gewinnung und dem Energieverbrauch, anhand von 4 Szenarien bis 2015, aus den Szenarien sollen politische Anreize auf der Versorgungs- und Verbrauchsseite angedacht werden

AUTOR*IN	AUFTRAG- GEBER*IN	TITEL	KURZBESCHREIBUNG	URB. MIN. DEFINITION	MOTIVATION UND ZIELE
(Lederer et al. 2016)	Lederer, J. et al.	Prospecting and exploring anthropogenic resource deposits: the case study of Vienna's subway network	Die Studie analysiert das Wiener U-Bahn-Netz, anhand von Materialkategorien und der zeitlichen und qualitativen Rückgewinnbarkeit von ebendiesen Materialien, um daraus ableiten zu können wie groß das Ressourcenpotential des Wiener U-Bahn-Netzes tatsächlich ist. Man kam man zur Feststellung, dass insbesondere Kupfer ein wichtiger Rohstoff ist, der im Bereich des U-Bahn-Netzes eine wichtige Sekundärrohstoffquelle darstellt, die monetär hoch belegt ist und auch zeitlich gesehen, bald austauschfähig wird/ist (30 Jahre Intervall).	ENG	Anhand des Wiener U-Bahn-Netzes festzustellen, welche Urban Mining Potenziale gegeben sind. Hierbei wollte man anhand der Materialintensität und dem ökonomischen Wert von Rohstoffen testen, ob dies Schlüsse auf das Urban Mining Potenzial geben kann.
(Lederer et al. 2014)	Lederer, J. et al.	A framework for the evaluation of anthropogenic resources: the case study of phosphorus stocks in Austria	In der Studie geht es um die Evaluierung der anthropogenen Ressourcen mithilfe eines kombinatorischen Ansatzes. Das Grundgerüst dieses Ansatzes bildet der USGS-Ansatz, der um MFA-/Prospektions-/Explorationsdaten des betrachteten Materials ergänzt wird. Die Besonderheit dieses Ansatzes ist, dass auch die Extraktionsmöglichkeit des jeweiligen Phosphorstromes betrachtet wird und so realistische Schlüsse bezüglich P-Sekundärquellen gezogen werden können.	WEIT	Mit dem neuen Ansatz sollte ist es möglich realistische anthropogene Lagerstätten von Phosphor (innerhalb Österreichs) zu evaluieren. Hierbei wurde gezielt der USGS-Ansatz erweitert um eine bessere Auflösung der Gegebenheiten zu erhalten, da gerade bei Phosphor die schwere Rückgewinnbarkeit bzw. die Kritikalität des Rohstoffes maßgebend sind.
(Daxbeck et al. 2015)	BMLFUW	Das anthropogene Lager in der Steiermark – Entwicklung eines Urban Mining Katasters	Implementierung eines Urban Mining Katasters für verschiedene Materialien samt Fallstudie für eine kleinere Stadt in der Steiermark; Ausführliche Darstellung von Maßnahmen und Rahmenbedingungen	ENG	Identifizierung, Quantifizierung, Bewertung und Visualisierung der anthropogenen Lagerstätten, deren gegenwärtige Nutzung und vorhandene Nutzungspotenziale; Umsetzung eines Urban Mining Katasters; Schaffung einer Entscheidungsgrundlage für diverse Anliegen/Bereiche
(Krook et al. 2015)	Krook, J. et al.	Urban infrastructure mines: on the economic and environmental motives of cable recovery from subsurface power grids	Variantenstudie mit 16 verschiedenen Kabelextraktionsmöglichkeiten anhand von 4 Hauptkriterien: (Extraktionstechnologie (konventionell vs. Kabel-X), Geografische Lage (Zentrum vs. Nicht-Zentrum), Projektart und (Straßen-) Oberflächenmaterial), Aufzeigen von Faktoren, die den Urban Mining Prozess maßgeblich bestimmen	ENG	Analyse von verschiedenen Kabelextraktionsverfahren, gegebener Einfluss von Technologien/ Märkten/ Methoden/ etc., Beurteilung der ökonomischen und ökologischen Machbarkeit von Urban Mining, Aufzeichnen von Faktoren, die für zukünftige Studien wichtig sein könnten

AUTOR*IN	AUFTRAG- GEBER*IN	TITEL	KURZBESCHREIBUNG	URB. MIN. DEFINITION	MOTIVATION UND ZIELE
(Wallsten et al. 2015)	Wallsten, B. et al.	The economic conditions for urban infrastructure mining: Using GIS to prospect hibernating copper stocks	Beurteilung des Urban Mining Potenzials mithilfe von GIS-Daten anhand einer schwedischen Stadt; Aufbau	ENG	Eine Methode um realistische Aufschlüsse über das Urban Mining Potenzial zu geben. Hierbei wurde der 2-Phasen-Ansatz etabliert, welcher auf der Kombination aus GIS-Daten und MFA beruht. Ökonomische Vergleiche, zwischen dem separierten oder integrierten Ausbau von Kabeln, sollen Potenziale und Schwachstellen des Systems hervorbringen.
(Dechantsreiter et al. 2015)	Umweltbundesamt (DE)	Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen	In der Studie des deutschen Umweltbundesamtes (2015) wurden Instrumente zur Sekundärrohstoffförderung im Bauwesen ausgearbeitet, da diesem Sektor ein großer Ressourcenverbrauch, als auch ein beträchtlicher Beitrag zum Gesamtabfallaufkommen Deutschlands, zugeschrieben werden. Dabei wurden verschiedene Bauteile des Bausektors betrachtet, um so die unterschiedlichen Eigenschaften und Rückbauarten zu berücksichtigen.	WEIT	Das Ziel der Studie war die Ermittlung von Instrumenten, die für eine effektive Sekundärrohstoffverwertung im Bausektor notwendig sind, da insbesondere der Bausektor einen beträchtlichen Beitrag zum Rohstoffverbrauch, sowie dem Gesamtabfallaufkommen, leistet. Anhand von erkannten Hemmnissen wurden unter anderem Strategien abgeleitet, die auf eine Verwertung von Baurestmassen abzielen.
(Fehring et al. 2014)	FFG (bmvit)	Schaffung von rechtlichen Potenzialen für Urban Mining im Abfallrecht	Rechtliche Fokussierung von Urban Mining aufgrund von (prozessorientierter) Analyse von Urban Mining Potenzialen	ENG (1. Projektteil) WEIT (2. Projektteil)	Analyse von zukünftigen Urban Mining Potenzialen, Findung neuer Steuerungsmöglichkeiten, Beurteilung der Gesetzeslage (Fokus: Abfallrecht)
(Weichbrodt 2014)	Weichbrodt, R.	Urban Mining - Strategien zur Nutzung der städtischen Rohstofflager	In der Publikation werden Strategien zu Urban Mining diskutiert und deren Potenziale aufgezeigt - mit Fokus: Deutschland. Vor allem durch die wachsende, weltweite Urbanisierung wird die Wichtigkeit von Urban Mining steigen, da dieser Trend mit einem enormen Einsatz von Baustoffen einhergeht.	ENG	Ziel der Publikation ist es Potenziale für Urban Mining aufzuzeigen und mit der aktuellen Situation in Deutschland zu vergleichen. Strategien für Urban Mining sollen abgeleitet werden, die mit der zukünftigen technologischen/ gesellschaftlichen Entwicklung einhergehen.

AUTOR*IN	AUFTRAG- GEBER*IN	TITEL	KURZBESCHREIBUNG	URB. MIN. DEFINITION	MOTIVATION UND ZIELE
(Wallsten et al. 2013)	Wallsten, B. et al.	To prospect an urban mine - assessing the metal recovery potential of infrastructure "cold spots" in Norrköping, Sweden	Die Studie von Wallsten et al. (2012) bewertete das Urban Mining Potenzial der Infrastruktur von Norrköping. Zusätzlich wurde in einer Case Study festgestellt, wie sich das Urban Mining Potenzial eines wirtschaftlichen "cold spot" Bezirks (frühere Industriegebiet) darstellt, um so auf mögliche - bisher unterschätzte - Urban Mining "hot spots" zu kommen. Im Gegenteil zu anderen Studien, befasst sich diese Studie nicht mit der ökonomischen Bewertung des Urban Mining Potenzials, sondern nur mit der reinen Ressourcenpotenzialabschätzung.	ENG	Beurteilung des Urban Mining Potenzials der Infrastruktur der Stadt Norrköping mittels eines GIS- und Materialdaten unterstützten MFA-Ansatzes. Weiters wurde das UM Potenzial von "cold spots" (alte Industriegebiete) beurteilt, um so zu bewerten, ob diese unterschätzte UM Potenziale aufweisen und somit als eigentliche "hot spots" gewertet werden sollten.
(Krook und Baas 2013)	Krook, J., Baas, L.	Getting serious about mining the technosphere: a review of recent landfill mining and urban mining research	In der Literaturübersicht von Krook et al. (2013) wird das generelle Urban und Landfill Mining Potenzial, anhand von aktuellen Studienergebnissen, evaluiert. Die Erkenntnisse der einzelnen Studien werden hierfür in vier Kategorien ("Metabolic flows", "Business dynamics", "Governance & Knowledge" und "Infrastructure & Markets") unterteilt, um so bessere Erkenntnisse in den einzelnen Subbereichen zu erhalten und in Folge klare Strategien abzuleiten.	WEIT	Das Ziel der Studie ist es einen Überblick der aktuellen Wissenschaftsbeiträge, zum Themenbereich "Urban und Landfill Mining", zu schaffen. Anhand von vier Kategorien ("Metabolic flows", "Business dynamics", "Governance & Knowledge" und "Infrastructure & Markets") sollen hierbei die Ergebnisse von relevanten Studien evaluiert werden, und so nötige Strategien aufzeigen.
(Krook et al. 2011)	Krook, J. et al.	Urban mining: hibernating copper stocks in local power grids	Konkreter Variantenvergleich zwischen separierter und integrierter Rückgewinnung von obsoleten Kabeln aus dem Stromnetz von zwei Städten, Kriterien wie zB. Netzgröße, Volt-Stärke, Kabelverbauung, Material (Cu/Al)	ENG	Analyse und Bewertung von obsoleten Kupferkabeln im Stromnetz von zwei schwedischen Städten, - monetärer Vergleich zwischen den relevanten Varianten
(Steger et al. 2011)	Steger, S. et al.	Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen	Erhebung der Materialbestände und -flüsse verschiedenster Unterkategorien der Infrastruktur, wobei kein starker Fokus auf dem Potenzial der Wiederverwendung liegt	ENG	- Darstellung von Materialbeständen und -flüssen zur Verdeutlichung des Primärressourcenverbaus und zugleich des Sekundärressourcenpotenzials - Ableitung von ersten Handlungsempfehlungen
(Graedel 2011)	Graedel, T. E.	The Prospects for Urban Mining	Darstellung der allgemeinen Urban Mining Situation mit Schwerpunkt auf Metalle. Dabei wurden 3 Kernfragen beantwortet: 1) Wie viel Metall gibt es?, 2) Wann werden diese Lager zugänglich sein? und 3) In welcher Form existieren diese Urban Mining Lager?	ENG	Klärung prinzipieller Fragestellungen zum Thema "Urban Mining", Änderungsbedarf an derzeitigem System, und dem dazugehörigen Kurs, aufzeigen

AUTOR*IN	AUFTRAG- GEBER*IN	TITEL	KURZBESCHREIBUNG	URB. MIN. DEFINITION	MOTIVATION UND ZIELE
(Lukschanderl 2011)	Lukschanderl, L.	Urban Mining. Die Stadt als Bergwerk der Zukunft. Sind Mülldeponien die "Goldgruben" von morgen?	In dem Buch werden anhand von verschiedenen Kapiteln die derzeitigen Schwachstellen und Potenzialen der Abfallwirtschaft und Industrie gezeigt. Dabei wird erkenntlich wo Urban Mining Potenziale stecken und wie man diese in Zukunft verbessern könnte. Es wird nur allgemein auf Bauschutt und Altmetalle eingegangen und dargestellt, dass vor allem bei Baumaterialien ein starker Wachstum - durch die stetige Urbanisierung - kommen wird und somit insbesondere hier ein Recycling sinnvoll ist.	WEIT / ENG (je nach Kapitel)	Gesamtüberblick über Abfallwirtschaft und damit verbundene Stoffströme und Stakeholder zu geben. Es soll Urban Mining Potenziale verdeutlichen und Ansätze dazu bieten. Der stückweise Ersatz der Primärrohstoffwirtschaft durch die Sekundärrohstoffwirtschaft wird soll damit begründet werden.
(Reisinger et al. 2009).	A-UBA	Lead, Cadmium and Mercury Flow Analysis - Decision Support for Austrian Environmental Policy	Im vorliegenden Artikel wird die Stoffflussanalyse (SFA) als Entscheidungshilfe auf dem Gebiet der Umweltpolitik besprochen. Die Flüsse und Lager von Blei (Pb), Kadmium (Cd) und Quecksilber (Hg) in der österreichischen Wirtschaft und in die Umwelt werden untersucht.	WEIT	The main objective was to produce a consistent and robust data set that can be used for decision making in environmental management as well as in waste and resources management.
(Lichtensteiger und Baccini 2008)	Lichtensteiger, T. et al.	Exploration of Urban stocks	Lichtensteiger und Baccini (2008) entwerfen in ihrer Studie ein Modell um auf nationaler/regionaler Ebene Urbane Lager - mit Schwerpunkt Gebäude und deren Infrastruktur - zu erkunden. Dafür verwenden sie klassische MFA-Ansätze und kombinieren sie mit virtuellen Gebäudeklassen, welche unterschiedlichen Bauperioden unterliegen. Die Ergebnisse zeigten, dass der Bauboom im 20. Jahrhundert der Schweiz vor allem von Industriegebäuden volumsmäßig geprägt ist.	ENG (WEIT: landfills included)	Durch den Einsatz von MFA in Kombination mit Materialdaten und Gebäudeklassifizierungen, soll es gelingen ein Bottom-Up-Modell zu erschaffen, dass es eine genaue Darstellung der Urbanen Lagerstätten in Bezug auf Gebäude ermöglicht.
(Rauch 2009)	Rauch J.N.	Global mapping of Al, Cu, Fe, and Zn in-use stocks and in-ground resources	Human activity has become a significant geomorphic force in modern times, resulting in unprecedented movements of material around Earth. An essential constituent of this material movement, the major industrial metals aluminium, copper, iron, and zinc in the human-built environment are mapped globally at 1-km nominal resolution for the year 2000 and compared with the locations of present-day in-ground resources.	WEIT	
(Kapur und Graedel 2006)	Kapur and Graedel 2006	Copper Mines Above and Below the Ground	Erhebung des urbanen Kupferlagers (anhand von Kapstadt) für 6 Sparten (bottom-up Ansatz); Ableitung von Urban Mining Potenzialen; Vergleich zu anderen Studien	ENG	Urban Mining Potenzialeinschätzung von Kupfer anhand von 6 Sparten, Erkennen von zukünftigen Schwerpunkten im Bezug auf Kupferrückgewinnung

AUTOR*IN	AUFTRAG- GEBER*IN	TITEL	KURZBESCHREIBUNG	URB. MIN. DEFINITION	MOTIVATION UND ZIELE
(Wittmer 2006)	Wittmer D.	Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt ein methodischer Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten	Diese Dissertation fokussiert auf die methodischen Besonderheiten, die es bei der Untersuchung von „Spurenstoffen“ wie Kupfer zu berücksichtigen gilt. Kupfer liegt unter 1 Gew. % der Gebäudemasse und gilt somit als Spurenstoff. Die kupferführenden Gebäudebauteile werden zur Ermittlung der Kupfergehalte in 5 Funktionsbereiche und 14 Produktgruppen geordnet. Die wichtigsten Funktionsbereiche sind der Dachbereich (40 %), die Stromanlagen (30 %), gefolgt von den Heizungs- und Sanitäreinrichtungen.	WEIT	Das Ziel ist die Entwicklung einer Methode zur Exploration von nicht-regenerierbaren Ressourcen im urbanen Raum am Beispiel des Kupfers, basierend auf umweltingenieur- und geowissenschaftlichen Ansätzen.
(Van Beers und Graedel 2003)	Van Beers D. and Graedel T.E.	The magnitude and spatial distribution of in-use copper stocks in Cape Town, South Africa	As a major urban centre, the city of Cape Town possesses a large reservoir of in-use copper. As the metal's uses become obsolete, the copper will gradually become available for re-use, should that prove technically feasible and economically desirable. To evaluate this resource, we identified the principal uses of the metal in the city and its surroundings, quantified them, and estimated their in-use lifetime. We used this information to estimate in-use stock at about 110 Gg (110 million kg) copper and to predict end-of-life flows for several decades into the future.	ENG	To address the following question in a particular way: is it desirable and feasible, from the perspective of resources and environmental considerations, to regard a large concentration as a major future source of materials, bearing in mind that the growth and proliferation of urban areas has led to higher concentrations of in-use resources in constrained geographical areas?
(Stark et al. 2003)	BMLFUW	Management von Baurestmassen nach den Gesichtspunkten der optimalen Ressourcennutzung und des langfristigen Umweltschutzes anhand der Güter- und Stoffbilanz des „Bauwerks Österreich“	Das Bauwesen ist jener Wirtschaftsbereich, der die größten Lager in der Anthroposphäre bildet. Der Output aus dem System „Bauwerk Österreich“ liegt in Form von Baurestmassen vor, welche zum größten Teil aus dem Abbruch, dem Umbau und der Sanierung von Bauwerken stammen. Nur ein wesentlich geringerer Teil (in Österreich in der Größenordnung von 10 % der Baurestmassen) stammt direkt aus dem Neubaugeschehen. Die gezielte stoffliche Bewirtschaftung der Baurestmassen durch die Abfallwirtschaft setzt daher unbedingt die Kenntnis des Lagerbestandes im „Bauwerk Österreich“ voraus.	WEIT	Ziel der Arbeit ist folgende Fragen sind zu bearbeiten: Wie ist das System "Bauwerk Österreich" zu definieren? Welche großen Güterflüsse können mit welcher Genauigkeit erhoben werden? Sind erste Stoffbilanzen möglich und wie umfassend sind Mengen- und Konzentrationsangaben? Wo sind die größten Probleme der Erhebung und wie wären sie zu beseitigen? Wie sehen grundsätzliche Aussagen zur heutigen Bewirtschaftung von Bauwerken auf Basis von Güter- und Stoffflüssen aus? Welche Defizite und Vorschläge ergeben sich?

AUTOR*IN	AUFTRAG- GEBER*IN	TITEL	KURZBESCHREIBUNG	URB. MIN. DEFINITION	MOTIVATION UND ZIELE
(Zeltner et al. 1999)	Zeltner, C. et al.	Sustainable metal management exemplified by copper in the USA	A sustainable management of nonrenewable metals calls for scientific-ecological understanding of the regional material household. The copper household in the USA between 1900 and 2100 was chosen to illustrate mathematical modelling of such systems. The long-term copper consumption stock is greater than the short term stock. Scenarios show that the current economically mineable Cu-stocks will be exhausted in 30 to 50 years if a change in the existing management system does not occur.	WEIT	Ziel ist die Beurteilung des geogenen und anthropogenen Cu Lagers und wie sich die Lager im Laufe der Zeit verändern.

Tabelle 22: Literatur Review – detaillierte Auswertung 2/2

AUTOR*IN	FOKUS DER STUDIE	MATERIALIEN	TIEFE DER ANALYSE	GEOGRAF. BEZUG DER GESAMTEN STUDIE	EMPFEHLUNGEN
(Kleemann und Lederer 2017)	Diverse aus Hochbau	mineralische Baustoffe und Metalle	Ressourcen- und Nutzen- Abschätzung	Städtisch (Wien)	Grobe Handlungsempfehlungen für Urban Mining, aufgrund des verringerten Ressourcenverbrauchs
(Kral et al. 2017)	Diverse aus Tief- und Hochbau	mineralische Baustoffe, Kunststoffe und Metalle	Potenzial- Abschätzung	Städtisch (Stockerau, Wiener Neustadt, Neunkirchen, Klagenfurt), Regional (Steiermark),	zukünftige Inventarisierung und Georeferenzierung von Materialbeständen, wirtschaftliche und ökologische Bewertung der Ressourcenpotentiale in der Netzinfrastruktur
(Müller et al. 2017)	Diverse aus Tief- und Hochbau	mineralische Baustoffe, Kunststoffe und Metalle	Potenzial- Abschätzung	National (Deutschland)	Anregungen bezüglich bereits etablierter und neuer Maßnahmen zur Förderung von Urban Mining - Bsp.: Sortierverfahren, Materialpass, Gesetzgebung
(Huisman et al. 2016)	Elektrogeräte, Fahrzeuge, Batterien	diverse Metalle	Potenzial- und Ressourcen- Abschätzung	E.U., Schweiz, Norwegen	Die Datenunsicherheiten minimieren, sowie weitere Informationsflüsse integrieren, um ein fortgeschrittenes Urban Mining Bild zu erhalten.
(Kleemann et al. 2018)	Diverse aus Hochbau	mineralische Baustoffe und Metalle	Ressourcen- Abschätzung	Städtisch (Wien)	Eine aktuelle und realistische Darstellung von Gebäudeabbaufüssen sollte nicht nur auf statistischen Daten beruhen, sondern auch Bildmatching-basierte Ansätze verwenden, da so eine zeitnahe Verfolgung der Abbruchaktivitäten über die Jahre möglich ist.

AUTOR*IN	FOKUS DER STUDIE	MATERIALIEN	TIEFE DER ANALYSE	GEOGRAF. BEZUG DER GESAMTEN STUDIE	EMPFEHLUNGEN
(Kleemann et al. 2017)	Diverse aus Hochbau	mineralische Baustoffe und Metalle	Potenzial- und Ressourcen-Abschätzung	Städtisch (Wien)	Basis für zukünftige Ressourcenkataster, Verbesserung der GIS-Daten (Kartierung, etc.), Bottom-Up-Ansatz
(Elshkaki et al. 2016)	Gesamt	Kupfer	Potenzial-Abschätzung	Global	politische Konsequenzen auf der Gewinnungs- sowie der Verbraucherseite (z.B. Gewinnungsseite: verstärkte Suche nach primären, neuen Cu-Quellen; verbesserte Recyclingraten), Verbraucherseite (effizientere Produktionssystem; verringerte Verwendung von Cu in dissipativen oder unrecyclebaren Prozessen; effizienterer Energieverbrauch in der Kupferindustrie)
(Lederer et al. 2016)	Diverse aus Tiefbau	mineralische Baustoffe und Metalle	Potenzial- und Ressourcen-Abschätzung	Städtisch (Wien)	Zukünftige Studien sollten vor allem auf die monetär hoch notierten, bzw. schneller wiedergewinnbaren Rohstoffen, wie Al, Cu und Kies/Schotter, basieren, da hier die stärksten Sekundärrohstoffpotenziale für die Zukunft bestehen. Zukunft sollte ein System aufgebaut werden, dass schon vorzeitige solche Ressourcenpotenziale erkennt, indem genauere Aufzeichnungen bezüglich der Einbauten und den EoLs einbezogen werden.
(Lederer et al. 2014)	Diverse aus Tief- und Hochbau inkl. Deponie	Phosphor	Potenzial- und Ressourcen-Abschätzung	National (Österreich)	Der Ansatz erwies sich als gute Methode, zur Beurteilung von anthropogenen P-Lagern (innerhalb Österreichs). In zukünftigen Studien sollte jedoch auch Augenmerk auf anthropogene Flüsse gelegt werden, da diese maßgeblich das Bestehen von P-Lagern beeinflussen. Weiters sollten (zukünftige) neue (Mining-)Technologieansätze/Gesetze/etc. berücksichtigt werden, da diese starken Einflüsse auf anthropogene Lager haben werden, und so z.B. zu besseren Uthoff-Grades führen könnten. Eine genauere Kenntnis von weiteren anthropogenen Lagern, wie zu Gebäuden, ist in folgenden Studien ebenfalls berücksichtigungswert, da hier relevante P-Vorkommen zu vermuten sind.
(Daxbeck et al. 2015)	Diverse aus Tief- und Hochbau	Diverse	Ressourcen- und Nutzen-Abschätzung	Städtisch (Graz-Eggenberg) (/Regional: Steiermark)	Rechtliche, technische und wirtschaftliche Handlungsempfehlungen z.B. Nutzung von anthropogenen Lagerstätten, Sekundärbaustoffe gefördert einsetzen
(Krook et al. 2015)	Netzinfrastruktur	diverse Metalle	Ressourcen- und Nutzen-Abschätzung	Städtisch (Linköping)	Studien mit Schwerpunkt auf Politik/ Märkte/ Gesetzgebung, zukünftige Berücksichtigung von der Kabel-X Methode, Anerkennung der ökologischen Bedeutsamkeit von Urban Mining

AUTOR*IN	FOKUS DER STUDIE	MATERIALIEN	TIEFE DER ANALYSE	GEOGRAF. BEZUG DER GESAMTEN STUDIE	EMPFEHLUNGEN
(Wallsten et al. 2015)	Netzinfrastruktur	Kupfer	Ressourcen- und Nutzen-Abschätzung	Städtisch (Linköping)	2-Phasen-Konzept (GIS-Daten + MFA), Vorsicht bei Auswertung, ob straßenbezogen oder materialdichtebezogen, Untersuchungsgebiet nach Charakteristika wie Industriegebiet, Innenstadt, etc. unterteilen, Kooperation mit anderen Bereichen wie Telekommunikation und Straßenbeleuchtung herstellen, neue Varianten studieren,
(Dechantsreiter et al. 2015)	Diverse aus Hochbau	mineralische Baustoffe und Metalle	Potenzial- und Nutzen-Abschätzung	National (Deutschland)	Aufgrund des großen Ressourcenbedarfs und dem großen Abfallaufkommen der Bauwirtschaft sollte an stärkeren, praxisnahen Wiederverwertungsstrategien gearbeitet werden. Hier sollte eine solide Schnittstelle zwischen Bauleitern und Recyclern gefunden werden, da nur so eine ganzheitliche Sekundärrohstoffstrategie für den Bausektor abgeleitet werden kann. Eine verstärkte Promotion von Sekundärrohstoffen sowie eine rechtliche Basis für den Handel soll geschaffen werden.
(Fehringer et al. 2014)	Netzinfrastruktur	mineralische Baustoffe, Kunststoffe und Metalle	Ressourcen- und Nutzen-Abschätzung	National (Österreich)	Weiterführende Ziele sind eine Urban Mining Datenbank, eine Handelsbörse für Materialien/Stoffe aus Urban Mining und Identifizierung relevanter Teilprozesse entlang des Produktlebenszyklus
(Weichbrodt 2014)	Diverse aus Tief- und Hochbau	mineralische Baustoffe und Metalle	Potenzial-Abschätzung	National (Deutschland)/ global	Urban Mining Strategien: (1) Design for Urban Mining (2) Ressourcenkataster (für Städte) (3) Urbane Prospektion (4) High-Technology für Trennung und Rückgewinnung
(Wallsten et al. 2013)	Diverse aus Tiefbau	diverse Metalle	Potenzial-Abschätzung	Städtisch (Norrköping)	Zukünftige Studien sollten eine ökonomische Bewertung inkludieren, und hierbei vor allem die damit anfallenden Ausgrabungskosten bewerten. Weiters sollten Leitungsdaten verifiziert werden (unter anderem mittels Laserscanner) und die historische Entwicklung der Stadt betrachtet und gewertet werden.
(Krook und Baas 2013)	Diverse aus Tiefbau	diverse Metalle	Potenzial-Abschätzung	Global	Politische Anreize für Urban und Landfill Mining Strategien und in weiterer Folge die Aufklärung der Gesellschaft in Bezug auf dessen Notwendigkeit und Potenzial. Ebenso sollte die Forschung in diesem Bereich stärker forciert werden, da diese den Grundstein für erfolgreiches Landfill (und Urban) Mining legen. Stärkere Interaktion zwischen den einzelnen Akteuren.
(Krook et al. 2011)	Netzinfrastruktur	diverse Metalle	Ressourcen- und Nutzen-Abschätzung	Städtisch (Linköping, Rothenburg)	für integrierte Kabelrückgewinnung, weiterer Fokus auf Kabel aus anderen Bereichen, wie z.B. Wasser- und Gasnetzwerke, alte Industriegebiete, stillgelegte Militäranlagen

AUTOR*IN	FOKUS DER STUDIE	MATERIALIEN	TIEFE DER ANALYSE	GEOGRAF. BEZUG DER GESAMTEN STUDIE	EMPFEHLUNGEN
(Steger et al. 2011)	Diverse aus Tiefbau	mineralische Baustoffe und Metalle	Potenzial- und teilweise Ressourcen-Abschätzung	National (Deutschland)	geringerer Primärressourcenverbrauch und dafür erhöhter Sekundärressourceneinsatz, Überdenken von Baunormen in Hinblick auf Einsparmöglichkeiten Einsatz von Recyclingmaterialien, Kataster für erdverlegte Leitungen, Ökobilanzierungen durchführen
(Graedel 2011)	-	Diverse	Potenzial-Abschätzung	Global	alle Beteiligten an Produktkreisläufen sollten Rahmenbedingungen schaffen, die Urban Mining ermöglichen, im Produktdesign sollte der Trend von erhöhtem Einsatz verschiedener Materialien zurückgefahren werden, sowie bessere Ausdauer von Produkten angestrebt werden, politische und ökonomische Anreize sollten ebenso zu erhöhtem und z.T. bedingungslosem Urban Mining leiten
(Lukschanderl 2011)	Diverse aus Tief- und Hochbau inkl. Deponie	mineralische Baustoffe, Kunststoffe und Metalle	Potenzial-Abschätzung	Global, National (Österreich)	Effizientere Rohstoff- und Stoffflusssysteme, welche Recycling und Verwertung als Grundprinzipien haben. Ebenso sollten Produktentwickler bzw. -designer bereits bei der Entwicklung das EoL Stadium des Produktes berücksichtigen.
(Reisinger et al. 2009).	Gesamt	diverse Metalle	Potenzial- und Ressourcen-Abschätzung	National (Österreich)	Um eine breite Basis für die zukünftige Gestaltung der Umweltpolitik zu erhalten, muss die quantitative SFA durch qualitative Informationen sowie durch zusätzliche Beurteilungshilfen ergänzt werden.
(Lichtensteiger und Baccini 2008)	Diverse aus Hochbau	mineralische Baustoffe und Metalle	Potenzial- und Ressourcen-Abschätzung	National (Schweiz)	Bottom-up Ansätze ermöglichen es qualitativ- sowie quantitativ-hochwertige Ergebnisse zu erhalten, sowie Beziehungen in Systemen zu berücksichtigen/ erkennen. Durch die Aufteilung in unterschiedliche Gebäudeklassen ist es zudem möglich genauere Materialeinsätze zu bestimmen, als auch zeitlich-unterschiedliche Bauperioden zu berücksichtigen.
(Rauch 2009)	Gesamt	diverse Metalle	Potenzial-Abschätzung	Global	This analysis highlights the magnitude at which in ground metal resources have been translocated to in-use stocks, largely from highly concentrated but globally dispersed in-ground deposits to more diffuse in-use stocks located primarily in developed urban regions.
(Kapur und Graedel 2006)	Diverse aus Tief- und Hochbau	Kupfer	Potenzial-Abschätzung	Städtisch (Cape Town), Global	Weitergehende Kupfer-Potenzialabschätzungen, Fokus auf kleinräumigem Maßstab (bei Erhebungen), da genauere Ergebnisse zu erwarten sind (Bottom-up Ansatz), Sekundärkupfer als Rohstoff gewinnen/wiedereinsetzen

AUTOR*IN	FOKUS DER STUDIE	MATERIALIEN	TIEFE DER ANALYSE	GEOGRAF. BEZUG DER GESAMTEN STUDIE	EMPFEHLUNGEN
(Wittmer 2006)	Diverse aus Tief- und Hochbau	Kupfer	Potenzial- und Ressourcen-Abschätzung	National (Schweiz)	Die Arbeit zeigt exemplarisch auf, wie das dynamische Modell für solche „Wenn-dann“-Szenarien künftig eingesetzt werden kann: Wenn die Umnutzung zugunsten der Dienstleistungsgebäude verläuft, dann wird entsprechend der Gebäude spezifischen Nutzungsmuster des Kupfers ein Rohstoffmehrabedarf erzeugt. Wenn bei dem Umbauprozess bei den neuen Dienstleistungsgebäuden konsequent auf Kupferbleche verzichtet wird, dann sinken die Emissionen um circa 20 %, obwohl das gesamte Kupferlager in den Gebäuden (einschließlich des Kupfers in der Haustechnik) eine leichte Zunahme bewirkt.
(Van Beers und Graedel 2003)	Diverse aus Hochbau	Kupfer	Potenzial-Abschätzung	Städtisch (Cape Town)	We conclude that if all end-of-life copper is reprocessed, rather than discarded or transferred outside the region, it could supply up to 60 % of Cape Town’s copper demand over the next three decades.
(Stark et al. 2003)	Diverse aus Tief- und Hochbau	Gesamt	Potenzial- und Ressourcen-Abschätzung	National (Österreich)	Die Kenntnisse über das Lager sind daher ausbauen, dabei sind auch langfristige Stoffausschleusung zu berücksichtigen. Nach stofflichen Kriterien optimierte Fraktionen anzustreben, z.B. durch selektive Materialrückholung und –Behandlung;
(Zeltner et al. 1999)	Gesamt	Kupfer	Potenzial- und Ressourcen-Abschätzung	National (USA)	Re-orientation of the copper management system, therefore, requires changes in the field of “consumption stock management”. Successful control of such changes is only ensured by defining system-specific parameters, such as stock inventories, recycling rates and recycling efficiency.

7.2 Fallstudie 1

Themenkomplexe der Interviews

AKTUELLES BZW. BISHERIGES PV-RECYCLING?

<i>Konkrete Erfahrungen</i>	<i>Zeitaufwand</i>
<i>Rechtliche Vorgaben</i>	<i>Probleme, Hindernisse, Barrieren</i>
<i>Gründe des Recyclings (Alter, Beschädigungen, usw.)</i>	<i>Wirtschaftlichkeit (Kosten für Recycling, Märkte für Materialien, usw.)</i>
<i>Mengen, Anfall an PV</i>	<i>außer Module auch WR und Kabel</i>
<i>Verbaute Materialien</i>	<i>Recyclingquote</i>
<i>PV-Technologien</i>	<i>Entwicklung über die letzten Jahre</i>
<i>Vorgehensweise/Schritte bzw. Maschinen für Recycling</i>	

ZUKÜNFTIGES PV-RECYCLING?

<i>Rechtliche Vorgaben</i>	<i>Zeitaufwand</i>
<i>Mengen, Anfall an PV</i>	<i>Probleme, Hindernisse, Barrieren</i>
<i>Verbaute Materialien</i>	<i>Wirtschaftlichkeit (Kosten für Recycling, Märkte für Materialien, usw.)</i>
<i>PV-Technologien</i>	<i>Recyclingquote</i>
<i>Vorgehensweise/Schritte bzw. Maschinen für Recycling</i>	

WELCHE MÖGLICHKEITEN DES DESIGN-FOR-RECYCLING & REUSE SEHEN SIE?

<i>Design-for-Recycling / Design-for-Reuse</i>	<i>Mehraufwand (Kosten, Energie) bei der Herstellung recyclingfähiger Produkte</i>
<i>PV-Technologien</i>	<i>Marketing, Image für Modulhersteller</i>
<i>Zeitaufwand</i>	<i>Optimales System zur effizienten Nutzung bzw. Rückgewinnung & Hemmnisse</i>
<i>Einfluss auf Wirtschaftlichkeit</i>	

WELCHE FAKTOREN SIND FÜR EIN WIRTSCHAFTLICH SINNVOLLES PV-RECYCLING AUSSCHLAGGEBEND?

<i>Einfluss Design-for-Recycling & Reuse</i>
<i>Gewichtung der Faktoren, Märkte für Materialien</i>
<i>Gründe des nicht wirtschaftlichen Recyclings</i>
<i>Vorgehensweise/Schritte: Manuelle Einzelarbeit vs. Recyclingmaschinen</i>
<i>Wirtschaftlichkeit durch höhere Mengen</i>

Interviews mit Expert*innen

Im Zuge der vorliegenden Case Study wurden Interviews mit Vertreter*innen der Recycling- bzw. Abfallwirtschaft, PV-Industrie, öffentlichen Institutionen und Forschungseinrichtungen durchgeführt. Folgende Personen wurden persönlich, telefonisch oder schriftlich befragt:

- Martin Aichinger, ertex solartechnik GmbH
- Michael Chochole, Swimsol GmbH
- Christian Ehrenguber, O.Ö. Landes-Abfallverwertungsunternehmen AG
- Rolf Frischknecht, treeze Ltd. - fair life cycle thinkingMarkus Gall, Institute of Polymeric Materials and Testing, JKU Linz
- Franz Haidinger, Amt der Oö. Landesregierung, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung Umweltschutz
- Christian Hillepold, energetica Energietechnik GmbH
- Hans Kronberger, Bundesverband Photovoltaic Austria
- Stephan Laske & Alois Grinschgl, Saubermacher Dienstleistungs AG
- Petra Lehner, UFH Holding GmbH
- Florian Maringer, Interessengemeinschaft Windkraft Österreich
- Christian Maurer & David Schönmayr, Business Upper Austria - OÖ Wirtschaftsagentur GmbH, Cleantech-Cluster
- Simon Niederkircher, base energy
- Christoph Panhuber, Energie AG Oberösterreich Power Solutions GmbH
- Philipp Rechberger, FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH, Forschungsgruppe ASIC
- Manuel Riedl, Technische Behandlungssysteme GmbH
- Andreas, Unterweger, REDJACK Heizung & Solar GmbH

7.3 Fallstudie 2

Tabelle 23: Angenommene Transportdistanzen im Rahmen der Fallstudie "Straßenbahnbezirk"

TRANSPORTWEG	DISTANZ [KM]
Baustelle – Deponie „langes Feld“	19
Baustelle – Metallschmelze/Recycling	200
Baustelle – MVA Spittelau	10
Primärrohstoffproduktion (Kunststoffe, Metalle) – Baustelle	200
Mineralische Baustoffe Produktion - Baustelle	20
Asphaltproduktion - Baustelle	20

Tabelle 24: Ökobilanzdatensätze zur Ermittlung des Ressourcenverbrauches und der Umweltauswirkungen aufgrund von Aufwendungen und Gutschriften im Rahmen der Variantenvergleiche bzw. Modelltrassenvergleiche

PROZESS	NAME IN DATENBANK/STUDIE	QUELLE
AUFWENDUNGEN		
THERMISCHE VERWERTUNG		
Kunststoffe (mehrere Prozesse)	Waste incineration - plastics waste, Location: CH (unter Berücksichtigung der spez. CO ₂ -Intensitäten)	[3]
Papier	Waste incineration – paper, Location: CH	[3]
METALLRECYCLING		
Stahl (Sekundärproduktion)	Steel production, electric, low-alloyed, Location: RER	[1]
Kupfer (Sekundärproduktion)	Treatment of copper scrap by electrolytic refining, Location: RER	[3]
Aluminium (Sekundärproduktion)	Aluminum, secondary production (in Europe).	[1]
Blei (Sekundärproduktion)	Lead, secondary production (in Europe).	[4]
DEPONIE		
Inertdeponie	Treatment of inert waste, inert material landfill, Location: CH	[3]
Asphaltdeponierung*	Treatment of waste asphalt, sanitary landfill. Location: CH	[3]
TRANSPORT		
Transport (mit LKW)	Transport, freight, lorry, all sizes, EURO6 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified, Location: RER	[3]
AUFGRABUNG		
Baggeraufwand	Excavation, hydraulic digger, Location: RER	[3]
GUTSCHRIFTEN		
NEUE KUNSTSTOFFE		
PVC (Primärproduktion)	Polyvinylchloride production, emulsion polymerization. Location: RER	[3]
PE (Primärproduktion)	Polyethylene pipe production, corrugated, DN 75. Location: RER	[3]
Sonstige Kunststoffe (Primärproduktion)	Extrusion production, plastic pipes. Location: RER	[3]
NEUE METALLE		
Stahl (Primärproduktion)	Steel production, converter, low-alloyed, Location: RER	[3]
Kupfer (Primärproduktion)	Copper production, primary, Location: RoW	[3]
Aluminium (Primärproduktion)	Aluminium, primary production (used in Europe).	[1]
THERMISCHE VERWERTUNG		
Fernwärme (Erdgas)	Heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical, Location: AT	[3]
Strom (Steinkohle)	Electricity production, hard coal, Location: AT	[3]
NEUE VERFÜLLMATERIALIEN		
Kies	Gravel production, crushed, Location: CH	[3]
Sand	Silica sand production, Location: DE	[3]

Quellen: [1] (EAA 2013), [2] (BBR 2018), [3] (Ecoinvent Association 2017), [4] Gemis v4.95 (Gemis 2018)

* Hinweis: Die Asphaltabfälle aus den Berechnungen zu den Modelltrassen werden gesondert zu einer Asphaltdeponie gebracht.

7.4 Fallstudie 3

Tabelle 25: Angenommene Transportdistanzen im Rahmen der Szenarien

TRANSPORTWEG	DISTANZ [KM]
Stahlwerk - Baustelle	100
Baustelle - Deponie	20
Baustelle - Sekundärbaustoff	20
Baustelle - MVA	40
Baustelle - BMHKW	40
Baustelle - Mitverbrennung (Zementwerk)	40
Baustelle - Metallrecycler	100
Baustelle - Wiederverwendung	20
Baustelle - Glasrecycler	40

Tabelle 26: Heizwerte und CO₂-Emissionsfaktoren (fossil) der betrachteten thermisch verwerteten Materialien (bezogen auf Feuchtmasse)

	HEIZWERT [MJ/KG]	C-GEHALT* [KG/KG]	CO ₂ FOSSIL** [KG CO ₂ /KG]	QUELLE
Holz (15 % Wassergehalt)	15,8	0,391	0	(Klimaaktiv Energieholz 2016)
Heraklith	0	0,111	0	schwer brennbar
Papier/Karton	15,0	0,377	0	(Bauforum Stahl 2018)
PVC	18,0	0,430	1,58	(Bauforum Stahl 2018)
diverse Kunststoffe	20,0	0,466	1,71	Annahme zu Mischung
Linoleum	20,9	0,481	0	(Bauforum Stahl 2018)
Bitumen (Pappe)	28,8	0,622	2,28	(Bauforum Stahl 2018)
EPS (Dämmplatten)	38,2	0,788	2,89	(Bauforum Stahl 2018)
Steinkohle	30,0	0,390	2,38	https://www.lagerhaus.at/heizwerttabelle+2500+1117386

*Kohlenstoffgehalt wurde anhand einer empirischen Beziehung aus C-Gehalt ermittelt: C-Gehalt = (Heizwert + 6,28) / 56,44

**Stöchiometrisch aufgrund des Kohlenstoffgehaltes ermittelt


Tabelle 27: Wirkungsgrade der Verbrennungsanlagen für Strom und Wärme bezogen auf den Heizwert des Brennstoffs

	STROM*	WÄRME*	
Müllverbrennung (MVA)	14 %	53 %	(Van Eygen et al. unter Begutachtung)
Biomasse-Heizkraftwerk	-	92 %	http://www.biomasseverband.at/bioenergie/energie-aus-biomasse/waerme/

Tabelle 28: Ökobilanzdatensätze zur Ermittlung des Ressourcenverbrauches und der Umweltauswirkungen aufgrund von Aufwendungen und Gutschriften im Rahmen der Bewirtschaftungsszenarien

PROZESS	NAME IN DATENBANK/STUDIE	QUELLE
AUFWENDUNGEN		
Aluminium (Sekundärproduktion)	Aluminium, secondary production (in Europe)	[1]
Beton	Beton der Druckfestigkeitsklasse C 20/25 – C35/45 (Durchschnitt)	[2]
Inertabfalldeponierung	Treatment of inert waste, inert material landfill, Location: CH	[3]
Stahl (Sekundärproduktion)	Steel production, electric, low-alloyed, Location: RER	[1]
Transport mit LkW	Transport, freight, lorry, all sizes, EURO6 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified, Location: RER	[3]
Kupfer (Sekundärproduktion)	Copper scrap refining, secondary production, Location: RoW	[3]
Schaumglas (Sekundärprod.)	Foam glass production from recycled glass, Location: CH	[3]
Kunststoffverbrennung (mehrere Prozesse)	Waste incineration - plastics waste, Location: CH (unter Berücksichtigung der spez. CO ₂ -Intensitäten in Tabelle A 2)	[3]
Papierverbrennung	Waste incineration – paper, Location: CH	[3]
Aufbereitung: Betonabbruch	Treatment of waste concrete, not reinforced, recycling, Location: CH	[3]
Aufbereitung: Ziegelabbruch	Treatment of waste brick, recycling, Location: CH	[3]
Dieserverbrauch (Baumaschinen)	Diesel, burned in agricultural machinery, Location: GLO	[3]
GUTSCHRIFTEN		
Aluminium (Primärproduktion)	Aluminium, primary production (used in Europe)	[1]
Stahl (Primärproduktion)	Steel production, converter, low-alloyed. Location: RER	[3]
Holz (Primärholz in Platte)	Market for cleft timber, measured as dry mass, Location: RER	[3]
Fernwärme (Erdgas)	Heat production, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW	[3]
Strom (Steinkohle)	Electricity production, hard coal, Location: AT	[3]
Schotter (nat. Gestein)	Gravel production, crushed, Location: CH	[3]
Sand (nat. Gestein)	Silica sand production, Location: DE	[3]
Kupfer (Primärproduktion)	Copper production, primary, Location: RoW	[1]
Holz, laminiert (substituiert durch Wiederverwendung)	Laminated timber element production, for outdoor use, Location: RER	[3]
Schaumglas (Primärproduktion)	Foam glass production from primary raw materials, Location: CH	[3]
Steinkohle	Hard coal, market for hard coal, Location: RoW	[3]
Ton	Market for clay, Location: CH	[3]

Quellen: [1] (EAA 2013), [2] (BBR 2018), [3] (Ecoinvent Association 2017), [4] (IBU 2016)



Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien
[bmvit.gv.at](https://www.bmvit.gv.at)